



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica

Tesis Doctoral

**Estudio Experimental y Análisis
Numérico de la Deseccación en Suelos
Arcillosos**

Presentada por:

Héctor Ulises Levatti

UPC

Tutores: Pere Prat Catalán y

Alberto Ledesma Villalba

Barcelona 2015



Acta de calificación de tesis doctoral

Curso académico: 2014/2015

Nombre y apellidos:

HECTOR ULISES LEVATTI

Programa de doctorado:

INGENIERÍA DEL TERRENO

Unidad estructural responsable del programa:

DETCG

Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando expone el tema de la su tesis doctoral titulada:

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA DESECACIÓN EN SUELOS ARCILLOSOS

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

☐

NO APTO

☐

APROBADO

☐

NOTABLE

☐

SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	
Vocal	Vocal	Vocal	

BARCELONA, _____ de _____ de _____

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

☐

SÍ

☐

NO

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidente de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	Secretario de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado

Barcelona a _____ de _____ de _____

**Departament d'Enginyeria del Terreny,
Cartogràfica i Geofísica**

**Estudio Experimental y Análisis
Numérico de la Deseccación en
Suelos Arcillosos**

Héctor Ulises Levatti

Tutor: Pere Prat Catalán

Co-tutor: Alberto Ledesma Villalba

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la
Universidad Politécnica de Cataluña

Barcelona, Abril de 2015

A mi padre Ulises

Investigación científica: es el nombre general que recibe el largo y complejo proceso en el cual los avances científicos son el resultado de la aplicación del método científico para resolver problemas o tratar de explicar determinadas observaciones.

Wikipedia

Resumen

La presente tesis se centra en el estudio de aspectos experimentales y numéricos de los procesos de desecación en suelos arcillosos de baja plasticidad que habitualmente resultan en retracción y a menudo agrietamiento.

Se presenta un exhaustivo Estado del Arte que define los antecedentes, variantes, objetivos, variables y factores que afectan al proceso. Además, se revisan los modelos teóricos y simulaciones numéricas existentes en la literatura para tratar el problema de desecación y agrietamiento del suelo.

El estudio experimental se centra en primer lugar en la auscultación para la detección de grietas en el interior de una masa de suelo que, por tanto, no son visibles, con una novedosa técnica en este campo: el georadar. Se ha recurrido a esta técnica por la necesidad de auscultación tridimensional y por sus ventajas operativas y económicas. Se incluye un estudio experimental con muestras rectangulares delgadas de suelo que permite estudiar la influencia de la relación de lados de las muestras y del tamaño inicial de las partículas de suelo. En esta tesis se ha ejecutado también un ensayo con una muestra cilíndrica sometida a un proceso de secado rápido utilizando la máxima capacidad de secado disponible en una cámara ambiental de laboratorio, fijando la temperatura más alta posible. La vertiente experimental de la tesis concluye con un ensayo completo de dos fases de secado y humedecimiento, y una fase de inundación, sobre una muestra de suelo cilíndrica, inexistente hasta la actualidad en la literatura.

Para el desarrollo teórico sobre el que se basa el modelo numérico objeto de esta tesis, se utiliza la Mecánica de Suelos no Saturados, la Resistencia de Materiales Clásica y conceptos de la

Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) para establecer el marco teórico necesario para formular varios fenómenos como son el flujo de agua en medios porosos deformables y el agrietamiento.

En el cuerpo de la tesis se expone de forma detallada la formulación matemática del modelo y su implementación en un programa de cálculo acoplado hidromecánico por el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de las Diferencias Finitas (MDF) en el entorno MATLAB. El objetivo final de este programa de cálculo es la simulación numérica del problema hidromecánico de flujo en un medio poroso deformable y del agrietamiento en suelos, para lo cual se recurre a la técnica de liberación de nodos. Se incluye además una propuesta para el uso de la MFLE para la descripción de algunas de las fases del agrietamiento.

En la tesis se llevan a cabo un gran número de análisis con el código desarrollado. Se simulan secciones transversales, radiales y diametrales de muestras prismáticas y cilíndricas de suelo sometido a procesos de secado, tanto desde el punto de vista teórico como con la intención de reproducir numéricamente los resultados experimentales disponibles tanto en la literatura como de los ensayos realizados en el desarrollo de esta tesis. Con estas simulaciones se determinan los mecanismos por los cuales el suelo se retrae y agrieta durante la desecación.

Palabras Clave: desecación, agrietamiento, retracción, flujo en medio poroso deformable, fractura, simulación numérica.

Héctor Ulises Levatti
Febrero de 2015

Research comprises "creative work undertaken on a systematic basis in order to increase the stock of knowledge, and the use of this stock of knowledge to devise new applications". The primary purposes of basic research (as opposed to applied research) are documentation, discovery, interpretation, or the research and development (R&D) of methods and systems for the advancement of human knowledge.

Wikipedia

Abstract

This thesis focuses on the experimental and numerical study of the desiccation processes of low-plasticity clayey soils that usually result in shrinkage and often in cracking.

A comprehensive state of the art that defines the background, variants, objectives, variables and factors affecting the process is presented. In addition, existing theoretical models and numerical simulations in the literature to address the problem of soil desiccation and cracking are reviewed.

The experimental study focuses in the first place on auscultation for detecting cracks within a soil mass, which are not visible, with a novel technique in this field: the Ground Penetrating Radar. This technique has been used because of the three-dimensional auscultation requirement and their operational and economic advantages. An experimental study with thin rectangular soil samples is included, that allow studying the influence of the aspect ratio of the samples and the initial size of the soil particles. As part of this thesis, a test has also performed with a cylindrical sample subjected to a rapid desiccation process using the maximum drying capacity available in an environmental chamber at the laboratory, setting the highest possible temperature. The experimental part of the thesis concludes with a comprehensive test of two phases of desiccation and wetting and one phase of flooding on a cylindrical sample of soil, non-existent until now in the literature.

For the theoretical development of the numerical model on which this thesis is based, Unsaturated Soils Mechanics, Classic Strength of Materials and concepts of Linear Elastic

Fracture Mechanics (LEFM) are used to establish the necessary framework for formulating various phenomena such as water flow in deformable porous medium and cracking.

In the body of the thesis, the mathematical formulation of the model and its implementation in a hydro-mechanical coupled program, based on the Finite Element Method (FEM) and Finite Difference Method (FDM) in a MATLAB environment are presented. The ultimate goal of this code is the numerical simulation of the flow in a deformable porous medium and cracking in soils, for which the node release technique is used. A proposal for using the LEFM for describing some of the phases of cracking is included as well.

The code developed in this thesis has been used to perform several numerical analyses. Transversal, radial and diametrical sections of cylindrical and prismatic soil samples subjected to drying processes are simulated. Simulations are made to reproduce numerically theoretical experiments and existing experimental results available in the literature as well as from the tests performed in the context of this thesis. The objective of these simulations is to determine the mechanisms by which the soil shrinks and cracks during desiccation.

Keywords: desiccation, cracking, contraction, flow in deformable porous media, fracture, numerical simulation.

Héctor Ulises Levatti
February 2015

Investigació científica: és el nom general que rep el llarg i complex procés en el qual els avenços científics són el resultat de l'aplicació del mètode científic per resoldre problemes o tractar d'explicar determinades observacions.

Wikipedia

Resum

Aquesta tesi es centra en l'estudi d'aspectes experimentals i numèrics dels processos de dessecació en sòls argilosos de baixa plasticitat que habitualment resulten en retracció i sovint esquerdament.

Es presenta un estat de l'art exhaustiu que defineix els antecedents, variants, objectius, variables i factors que afecten al procés. A més, es revisen els models teòrics i simulacions numèriques existents a la literatura per tractar el problema de dessecació i l'esquerdament del sòl.

L'estudi experimental es centra en primer lloc en l'auscultació per a la detecció d'esquerdes a l'interior d'una massa de sòl, que per tant no són visibles, amb una nova tècnica en aquest camp: el georadar. S'ha utilitzat aquesta tècnica per la necessitat d'auscultació tridimensional i pels seus avantatges operatius i econòmics. S'inclou un estudi experimental amb mostres rectangulars primes de sòl que permet estudiar la influència de la relació de costats de les mostres i de la mida inicial de les partícules de sòl. En aquesta tesi s'ha executat també un assaig amb una mostra cilíndrica sotmesa a un procés d'assecat ràpid utilitzant la màxima capacitat d'assecat disponible en una cambra ambiental de laboratori, fixant la temperatura més alta possible. El vessant experimental de la tesi conclou amb un assaig complet de dues fases d'assecat i humectació i una fase d'inundació, sobre una mostra de sòl cilíndrica, inexistent fins a l'actualitat en la literatura.

Per al desenvolupament teòric sobre el qual es basa el model numèric objecte d'aquesta tesi, s'utilitza la Mecànica de Sòls no Saturats, la Resistència de Materials Clàssica i conceptes de la

Mecànica de Fractura Lineal Elàstica (MFLE) per establir el marc teòric necessari per formular diversos fenòmens com són el flux d'aigua en mitjans porosos deformables i l'esquerdament.

En el cos de la tesi s'exposa de forma detallada la formulació matemàtica del model i la seva implementació en un programa de càlcul acoblat hidromecànic pel Mètode dels Elements Finitis (MEF) i el Mètode de les diferències finites (MDF) en l'entorn MATLAB. L'objectiu final d'aquest programa de càlcul és la simulació numèrica del problema hidromecànic de flux en un medi porós deformable i de l'esquerdament en sòls, fent servir la tècnica d'alliberament de nodes. S'inclou a més una proposta per a l'ús de la MFLE per a la descripció d'algunes de les fases del esquerdament.

A la tesi es duen a terme un gran nombre d'anàlisis amb el codi desenvolupat. Es simulen seccions transversals, radials i diametral de mostres prismàtiques i cilíndriques de sòl sotmeses a processos d'assecat, tant des del punt de vista teòric com amb la intenció de reproduir numèricament els resultats experimentals disponibles tant en la literatura com dels assaigs realitzats en el desenvolupament d'aquesta tesi. Amb aquestes simulacions es determinan els mecanismes pels quals el sòl es retreu i s'esquerda durant la dessecació.

Paraules Clau: dessecació, esquerdament, retracció, flux en medi porós deformable, fractura, simulació numèrica.

Héctor Ulises Levatti
Febrer de 2015

Ingeniería: "Estudio y aplicación, por especialistas, de las diversas ramas de la tecnología."

Real Academia Española

"Engineering is the application of scientific, economic, social, and practical knowledge in order to design, build, and maintain structures, machines, devices, systems, materials and processes."

Wikipedia

Prefacio

Luego de mi carrera de grado realizada en Argentina, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Chaco, y en medio de una gran crisis económica, decidí que era hora de emigrar en busca de nuevas oportunidades respecto de mi profesión de ingeniero a través de más formación. Fue así, como en Enero de 2004, comencé el Master en Métodos Numéricos en el CIMNE. Ya antes de viajar a Barcelona, solicité una beca de doctorado en el contexto del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, para trabajar en la línea de investigación de grietas por desecación en suelos, puesto que mi objetivo era aprender y aplicar los métodos numéricos a problemas de ingeniería.

La línea de investigación de grietas por desecación, es una línea ambiciosa, puesto que se trata de investigación fundamental con objetivos de aplicación práctica. El desarrollo de una formulación matemática e implementación de un modelo para simular el proceso de agrietamiento en suelos arcillosos es quizás uno de los mayores desafíos al que me he enfrentado a lo largo de mi carrera profesional.

Avanzar en el conocimiento y comprensión de un problema de esta naturaleza es un trabajo de muchos años de esfuerzo e investigación. Afortunadamente, no se ha comenzado este proceso recientemente, sino que, se lleva trabajando alrededor de una centuria con los primeros intentos a principios del siglo pasado. De igual forma, no estamos solos ante el desafío, existen varios centros en el mundo que investigan este proceso de desecación y agrietamiento.

Sin embargo, a pesar del gran esfuerzo y empeño puestos, hace diez años poco se sabía a cerca de las causas y razones por las cuales los suelos se comportan como lo hacen ante un cambio en las variables medioambientales. Esta fue la razón de la existencia de la línea de investigación de grietas por desecación en suelos en este departamento, y la consecuencia natural fue el desarrollo de proyectos y de procesos de formación de personal investigador. Esta tesis doctoral es una pequeña parte del gran desafío encarado por este centro.

En ingeniería, el objetivo último no es la comprensión cabal de los fenómenos naturales, cuya tarea es de la física, sino la aplicación práctica en la resolución de problemas. Sin embargo, la necesidad de sólidas bases teóricas y experimentales nos llevan a solaparnos con los físicos en el afán de comprensión para poder luego realizar la aplicación para la cual nos hemos formado.

Esta tesis es de carácter fundamental pero escrita por un ingeniero. Presenta un enfoque teórico, experimental y numérico, pero siempre teniendo en mente la aplicación y la resolución de problemas de manera práctica.

Organización de la tesis

La tesis se ha escrito con la idea de presentar de manera clara y precisa el trabajo realizado. De esta forma a resultado una tesis dividida en 6 capítulos.

El capítulo 1, a manera de introducción, presenta primeramente una descripción del fenómeno que se estudia. El problema de desecación y agrietamiento es un proceso natural, pero que se estudia en laboratorio, al menos la mayor parte de las veces. Por ese motivo, se distingue el contexto del campo y el laboratorio para fijar conceptos y ver con precisión cuales son las diferencias en estos dos ambientes esencialmente distintos. En segundo lugar, se presentan los objetivos de la tesis que han sido ambiciosos desde el principio y lejos de ir reduciéndose con el transcurso de los años fueron creciendo hasta adoptar la forma finalmente presentada. En tercera instancia, se ha considerado muy importante definir con precisión el campo de aplicación de este estudio fundamental, por lo cual, se detallan algunos ejemplos donde el conocimiento del problema es vital. A continuación, se define lo que se entiende por desecación en suelos y su relación con la retracción y el agrietamiento, que aunque parezca trivial, conviene definir desde un principio. Seguidamente, se define el alcance de la tesis para concretar cuál es la pretensión del autor con este trabajo. Finalmente, se explica la metodología de trabajo y las hipótesis adoptadas para realizarlo.

A partir de aquí, la tesis presenta tres partes bien diferenciadas: la primera, Capítulo 2 es un estado del arte que finaliza con conclusiones que delinean el estado del conocimiento y las líneas de pensamiento a seguir; la segunda parte, Capítulos 3, es de carácter experimental y la tercera parte, Capítulos 4 y 5 es esencialmente teórico-numérica.

El capítulo 2, presenta un exhaustivo estado del arte abarcando las tres vertientes de investigación: teórica, experimental y numérica. Se considera importante ser exhaustivo por la complejidad del tema y porque existe en la literatura gran cantidad de información sumamente útil para el desarrollo de esta tesis y futuros trabajos respecto del tema. En las conclusiones de este capítulo se condensa todo lo posible la información que procede de la literatura y como aporte se ordenan y sistematizan los conceptos y aspectos más importantes.

El capítulo 3 presenta un estudio experimental del problema, centrándose primeramente en la auscultación con una novedosa técnica en este campo: el Georadar. Se ha recurrido a esta técnica, como resultado de la necesidad de auscultación tridimensional, por sus ventajas operativas y económicas. En su parte central, el capítulo 3 presenta un estudio experimental de bandejas rectangulares de poco espesor. Este tipo de estudio es al día de hoy un clásico en grietas por desecación pero no por ello resulta trivial y ciertamente se pueden extraer muchas conclusiones de su realización. Además, se presenta un ensayo en bandeja circular, la cual fue sometida a secado rápido, fijando la temperatura a los máximos valores posibles en la cámara ambiental. Finalmente, este capítulo concluye la vertiente experimental, con un ensayo completo de ciclos de secado-humedecimiento-inundación-secado-humedecimiento. Este ensayo es innovador en muchos aspectos, cerrando el estudio del proceso completo a que suele estar sometido el suelo en la naturaleza, controlando las principales variables mediante el uso y montaje de una cámara ambiental mejorada.

El capítulo 4 abre las puertas de la vertiente teórico-numérica, presentando la formulación matemática utilizada en este estudio. Se presenta en detalle cada aspecto de la formulación por considerarse importante para la continuidad de la línea de investigación. Se detallan y amplían muchas cuestiones en orden de dar consistencia al trabajo y a la presentación. A continuación, se presenta la resolución del problema hidromecánico por el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de las Diferencias Finitas (MDF). Se presenta el código programado exclusivamente para esta Tesis en el entorno MATLAB, explicando la técnica utilizada para la simulación del inicio y propagación de las grietas. Finalmente, el capítulo presenta una propuesta del uso de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) y sus particularidades para este problema.

El Capítulo 5 presenta las simulaciones numéricas obtenidas con el código implementado en el entorno MATLAB y su relación con los ensayos de laboratorio de la literatura y aquellos realizados tanto para esta tesis como para trabajos anteriores en el Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica de la UPC.

Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones y las futuras líneas de investigación en el tema de grietas por desecación en suelos. El documento se completa con una serie de anexos que dan algunos detalles que se consideran importantes para darle un carácter de auto contenido.

"De gente bien nacida es agradecer los beneficios que reciben".

Don Quijote de la Mancha. Miguel de Cervantes Saavedra.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a mis tutores de doctorado Pere Prat Catalán y Alberto Ledesma Villalba. Gracias sobre todo por el apoyo en este largo camino que me ha llevado finalmente a la obtención del título de Doctor en Ingeniería del Terreno.

Un particular agradecimiento a Pere por abrirme las puertas del Departamento de Ingeniería del Terreno, por su excelente predisposición a ayudarme en mi desarrollo profesional durante la carrera de Ingeniería de Caminos y en el Doctorado. Agradezco su predisposición para poder reunirme con mi familia desde el momento en que comencé el Doctorado. Además, agradezco la oportunidad de mi primer contrato en la UPC como Personal de Soporte a la Investigación.

Agradezco a Alberto Ledesma por el soporte económico durante varios meses después de finalizada mi beca FPI mediante proyectos a través del CIMNE y por su soporte técnico en cuestiones numéricas durante la formulación y análisis de resultados del modelo numérico.

Agradezco la oportunidad que me han otorgado de poder trabajar en esta prestigiosa institución, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, galardonada con la mención de calidad (hasta 2010) y excelencia (desde 2011) del Ministerio de Educación y Ciencia del gobierno de España, previa evaluación de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación. Código de la mención de calidad: MCD2004-00409. Mención concedida y renovada para los años 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010. Código de la mención de excelencia: MEE2011-0314. Mención concedida para los años 2011, 2012 y 2013.

Gracias a mi familia, especialmente a mi esposa Sandra y mi hijo Alejandro, quienes son siempre una fuente de inspiración y motivación en todo desafío que me propongo.

Gracias además al apoyo incondicional de mi madre Felicita, mis hermanos Carmen, Oscar y mi cuñado Luis que siempre están allí, en Argentina, apoyando a través de la distancia en todos mis proyectos.

Especial agradecimiento al Dr. Jaume Clapés, por su tiempo y predisposición a explicar temas relacionados con geo-radares.

Un especial agradecimiento a mis amigos sanjuaninos: Ruben Rodari y Lucas Garino, por su amistad y ayuda en el laboratorio de geotecnia del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC y en la Universidad Nacional del San Juan.

Una especial mención de gratitud para el Dr. Francisco Zabala, Director del Instituto de Investigaciones Antisísmicas y profesor de la Universidad Nacional de San Juan, por sus sabios consejos de cómo encarar la vida y el doctorado.

Expreso mi gratitud a mi amigo Albert Marques, por su excelente soporte en materia informática y a Oscar y Maricarmen por su apoyo desde la administración del departamento.

Agradezco particularmente al Dr. Mauro Sebastián Innocente por la infinidad de consejos, apoyo para hacer realidad mi presente trabajo, ayuda con el inglés en los momentos más álgidos, y sobre todo por su amistad.

Un especial agradecimiento a la Dra. Alessandra Dimariano por la corrección de mis primeros manuscritos, además, por su amistad e infinidad de charlas.

Agradezco al Dr. Jubert Andrés Pineda por las muchas charlas. Con él he aprendido mucho de geotecnia.

Desde 2004, el departamento de Ingeniería del Terreno ha sido mi casa. Así pues, agradezco a toda la gente que forma parte tanto del departamento como de la Universidad y la Escuela de Caminos, Canales y Puertos. En especial agradezco a la gente del laboratorio José y Víctor, el soporte informático Albert y Joan y la administración del Departamento de Ingeniería del Terreno Oscar, Maricarmen, Eva y Víctor.

Expreso aquí mi agradecimiento a todos mis amigos que apoyan y dan ánimos cuando hace falta.

Expreso aquí, un especial agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia de España porque ha hecho posible a través de mi beca FPI y los proyectos: GRIDES BIA2003-03417 (Período 1/12/2003-30/11/2006) y ENVOSCRACK CGL2006-09847 (Período 1/10/2006-30/09/2009) mi formación de doctor. El proyecto EVOCK-3D BIA2009-08341 (Período 1/10/2010-31/12/2012) me permitió trabajar como investigador en la UPC durante el año 2011.

Larga fue mi formación técnica, desde la ENET N°1 (Maestro Mayor de Obras) y la UNNE (Ingeniero en Construcciones). El máster en métodos numéricos del CIMNE, el postgrado en análisis estructural en la Fundació UPC. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en la ETSECCPB, UPC. Agradezco a todas estas instituciones.

Una especial mención a la “École Polytechnique Fédérale de Lausanne” (EPFL) y al Profesor Lyesse Laloui por el soporte para realizar la estancia de 3 meses en Lausana, Suiza en 2007.

Mi reconocimiento al apoyo del proyecto ASTUTE que es mi actual medio de vida y desarrollo profesional. Particularmente al profesor Johann Sienz por darme la oportunidad de trabajar en Swansea, UK en el proyecto ASTUTE.

Finalmente, un especial agradecimiento y recuerdo a mi padre Ulises el cual en gran parte ha hecho de mí lo que soy y fue el hombre más extraordinario que he conocido hasta el día de hoy.

“Un padre que da consejos más que Padre es un amigo; así, como tal les digo que vivan con precaución: nadie sabe en qué rincón se oculta el que es su enemigo”.

La vuelta de Martín Fierro. José Hernández (1834-1886)

Héctor Ulises Levatti
Barcelona, Febrero de 2015

"La imaginación es más importante que el saber"

Albert Einstein

Acrónimos

MMC: Mecánica de Medios Continuos

MF: Mecánica de Fractura

MFLE: Mecánica de Fractura Lineal Elástica

MS: Mecánica de Suelos

MSS: Mecánica de Suelos Saturados

MSNS: Mecánica de Suelos no Saturados

MEF: Método de los Elementos Finitos

MDF: Método de las Diferencias Finitas

RM: Resistencia de Materiales

EDPs: Ecuaciones en Derivadas Parciales

CA: Cámara Ambiental

Equivalencia de Términos Español-Inglés

Arqueo: Curling

Retracción: Shrinkage

Resistencia a Tracción: Tensile Strength

Humedad: Moisture Content

Enfoque de la Resistencia de Materiales: Strength-of-Material Approach

Factor de Intensidad de Tensiones: Stress Intensity Factor

Tenacidad de Fractura: Fracture Toughness

Rigidez: Stiffness

Flexibilidad: Compliance

Notación y Símbolos

1. Elementos de las Ecuaciones de Equilibrio y Balance

1.1. Rigidez y flexibilidad (Tensores Cartesianos de Cuarto Orden)

C_{ijkl} ó \mathbf{C} : Tensor de rigidez (Stiffness)

D_{ijkl} ó \mathbf{D} : Tensor de flexibilidad (Compliance)

1.2. Tensiones y Deformaciones (Tensores Cartesianos de Segundo Orden)

σ_{ij} ó $\boldsymbol{\sigma}$: Tensor de tensiones totales de Cauchy.

σ_{ij}^{neta} ó $\boldsymbol{\sigma}^{neta}$: Tensor de tensiones netas.

ε_{ij} ó $\boldsymbol{\varepsilon}$: Tensor de deformaciones infinitesimales, son las deformaciones del esqueleto de suelo (recordar que son funciones de los desplazamientos de las partículas del suelo).

1.3. Desplazamientos (Magnitudes Vectoriales, Tensores de Primer Orden)

u_i ó \mathbf{u} : Vector de desplazamientos de las partículas que forman el esqueleto de suelo.

w_i ó \mathbf{w} : Vector de desplazamiento del fluido relativo a las partículas.

$\dot{w}_i \equiv q_i$ ó \mathbf{q} : Vector velocidad en el sentido de Darcy.

$$\dot{U}_i = \dot{u}_i + \frac{\dot{w}_i}{n}$$

ó $\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{u}} + \frac{\mathbf{q}}{n}$: Vector velocidad absoluta del fluido.

1.4. Tensiones y Deformaciones (Magnitudes Escalares)

σ_m^{neta} ó p :	Tensión media neta
s :	Succión matricial
u_w :	Presión de agua (compresiones positivas)
u_a :	Presión de aire (compresiones positivas)
ε_v :	Deformación volumétrica del esqueleto de suelo debida a acciones mecánicas (tensiones netas)
ε_v^s :	Deformación volumétrica del esqueleto de suelo debida al efecto de la succión (efecto hidráulico)

1.5. Parámetros materiales mecánicos

\mathbf{g} :	Vector aceleración de la gravedad.
K :	Módulo de deformación volumétrica (mecánico)
K^s :	Módulo de deformación volumétrica debida a succión (hidráulico)
G :	Módulo de corte (mecánico)
e :	Relación de vacíos
e_0 :	Relación de vacíos inicial
n :	Porosidad
n_0 :	Porosidad inicial
a_1, a_2, a_3, a_4 :	Parámetros constantes de la superficie de estado

1.6. Parámetros materiales hidráulicos

K_{ij}^P ó \mathbf{K}^P :	Tensor permeabilidad.
k^r :	Permeabilidad relativa del agua.
μ^l :	Viscosidad dinámica del agua.
K^s :	Módulo volumétrico de los granos de suelo.

K^w :	Módulo volumétrico del agua.
S_r :	Grado de saturación de agua.
p_{ref} :	Presión de referencia
P_{atm} :	Presión atmosférica
λ :	Parámetro material de la curva de retención de Van Genuchten.
P_0 :	Valor de entrada de aire a la porosidad de referencia n_0 .
f_n :	Función propuesta que tiene en cuenta la influencia de la porosidad en la curva de retención mediante el parámetro η .
η :	Parámetro de la función f_n

1.7. Densidades

ρ^s :	Densidad de las partículas sólidas del suelo.
ρ^w :	Densidad del agua.
ρ^a :	Densidad del aire.
ρ :	Densidad del suelo como conjunto de dos o tres fases distintas.

1.8. Operadores

δ_{ij} :	Delta de Kronecker
$\mathbf{1}$:	Tensor de segundo orden unitario ($\mathbf{1} \equiv \delta_{ij}$)
\mathbf{L} :	Operador matricial divergencia
\mathbf{n} :	Operador de proyección ortogonal

2. Notaciones usualmente usadas en Mecánica de medios continuos

En mecánica de medios continuos se utilizan habitualmente tres tipos de notación que se denominan: notación indicial o de Einstein, notación matricial y notación compacta. Las tres tienen su origen en la necesidad de escribir de manera más compacta y manejable expresiones que de lo contrario serían muy extensas. La existencia de 3 tipos de notaciones junto con algunas variantes dentro de cada una trae confusiones que conviene aclarar. Por otro lado, para programar un código de elementos finitos es necesario explicitar y saber con exactitud que representan las ecuaciones de la formulación.

A veces aparecen complicaciones debido a las dimensiones del espacio, complicaciones debido a la notación ingenieril o notación de Voigt y debido a que solo se dan reglas de la notación indicial o de Einstein incompletas.

Al usar la notación de Voigt, para trabajar con vectores en lugar de tensores de tensión y deformación complicamos los operadores vectoriales gradiente y divergencia así como también el delta de Kronecker y los operadores de proyección. También se complican las matrices de rigidez y flexibilidad.

Las notaciones compacta y matricial parecen indistinguibles en ciertos casos salvo que se hagan ciertas aclaraciones. Los escalares son escritos en caracteres normales y magnitudes vectoriales o tensoriales en negrita.

A veces, las matrices se escriben con subíndices como la notación indicial y comparten ciertas reglas en cuanto a las operaciones.

Las siguientes tablas presentan ejemplos esclarecedores respecto de las notaciones.

2.1. Tensor de tensiones de segundo orden ortogonal en espacio tridimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
σ_{ij} $i, j = 1 \dots 3$	σ	$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} =$ $= (\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{12} \ \sigma_{23} \ \sigma_{31})^T$

2.2. Tensor de tensiones de segundo orden ortogonal en espacio bidimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
σ_{ij} $i, j = 1 \dots 2$	σ	$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} =$ $= (\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{12})^T$

2.3. Tensor de tensiones de segundo orden ortogonal en espacio unidimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
σ_{ij} $i, j = 1$	σ	σ_{11}

2.4. Relación tensión-deformación:

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial de Voigt
$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ $i, j = 1..3$	$\sigma = D\varepsilon$	$\sigma = (\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{12} \ \sigma_{23} \ \sigma_{31})^T =$ $= \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1123} & D_{1131} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2223} & D_{2231} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3323} & D_{3331} \\ & & & D_{1212} & D_{1223} & D_{1231} \\ \text{Simétrica} & & & & D_{2323} & D_{2331} \\ & & & & & D_{3131} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \end{bmatrix}$

2.5. Delta de Kronecker en espacio tridimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
δ_{ij} $i, j = 1 \dots 3$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ <p>En notación de Voigt:</p> $\mathbf{m}^T = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$

2.6. Delta de Kronecker en espacio bidimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
δ_{ij} $i, j = 1 \dots 2$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ <p>En notación de Voigt:</p> $\mathbf{m}^T = [1 \quad 0 \quad 0]^T$

2.7. Delta de Kronecker en espacio unidimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
δ_{ij} $i, j = 1$	1	$\mathbf{I} = [1]$ <p>En notación de Voigt:</p> $\mathbf{m}^T = [1]^T = 1$

2.8. Ecuación de equilibrio en espacio tridimensional

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = 0$	$\nabla \cdot \sigma + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$ ó $\nabla^T \sigma + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$ ó $\text{div}(\sigma) + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$	$\mathbf{L}^T \sigma + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}^*$

2.9. Notación compacta y explícita del operador nabla ∇ , el tensor de tensiones σ y el vector de campo de gravedad \mathbf{g}

$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$	$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$	$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$		

2.10. Ecuación de equilibrio escrita en notación matricial de Voigt explícita

La ecuación de equilibrio de la matriz de suelo se suele escribir en notación matricial utilizando la notación de Voigt para los tensores de tensión y de deformación infinitesimal. La expresión y sus elementos son los siguientes:

$$\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

2.11. Condición de contorno en tensión

Notación de Einstein	Notación compacta	Notación matricial
$(\sigma_{ij} - u_a) n_j = (\sigma_{ji} - u_a) n_j = T_i$ $i, j = 1 \dots 3$ <p><i>a no es subíndice</i></p>	$(\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1}) \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}}$ <p>en Γ</p>	$\mathbf{I}^T (\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{m}) - \bar{\mathbf{t}} = 0$ <p>en Γ</p>

2.12. Condición de contorno de tensión en notación compacta explícita

$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \\ n_y & n_x & 0 \\ 0 & n_z & n_y \\ n_z & 0 & n_x \end{bmatrix}$	$(\boldsymbol{\sigma} - u_a) =$ $= \begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} (\sigma_x - u_a) & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & (\sigma_y - u_a) & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & (\sigma_z - u_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$		

2.13. Condición de contorno de tensión en notación matricial explícita

$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$	$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 \\ 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_z \\ n_y & n_x & 0 \\ 0 & n_z & n_y \\ n_z & 0 & n_x \end{bmatrix}$	$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_y & 0 & n_z \\ 0 & n_y & 0 & n_x & n_z & 0 \\ 0 & 0 & n_z & 0 & n_y & n_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x - u_a \\ \sigma_y - u_a \\ \sigma_z - u_a \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$		

Lista de Ilustraciones y Tablas

FIGURAS	PAG
Figura 1.1 - Suelo que presenta tres estados.....	5
Figura 1.2 - Agrietamiento por desecación en suelos arcillosos. <i>Río Grande, México</i>	5
Figura 1.3 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación 1.....	6
Figura 1.4 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación 2.....	7
Figura 1.5 - Patrones hexagonales en sedimentos uniformes, <i>Nevada</i> (Lau, 1987).....	8
Figura 1.6 - Patrones hexagonales <i>Mt. Rainer National Park, Washington</i> (Lau, 1987)...	8
Figura 1.7 - Cámara ambiental en el laboratorio del Dpto. de Ing. del Terreno, UPC.....	10
Figura 1.8 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación en bandejas circulares y rectangulares en el laboratorio.....	11
Figura 1.9 - Patrón final de grietas en bandeja de suelo A2-10.....	12
Figura 1.10 - Arqueo Obtenido en Muestras de Arcilla de Barcelona Desecadas en el Laboratorio (Lakshmikantha, 2009)	12
Figura 1.11 - Ensayo cíclico: Secado, humedecimiento, secado, inundación y secado....	13
Figura 1.12 - Enfoque del problema de desecación en suelos.....	26
Figura 2.1 - Vertientes Experimental, Teórico-Experimental y Numérica del Estudio de Desecación y Agrietamiento en Suelos desde hace casi 100 años.....	31
Figura 2.2 - Relación entre tiempo necesario para la primera grieta y espesor de la muestra (Corte & Higashi, 1960)	41
Figura 2.3 - Evolución del contenido de humedad del suelo. <i>a) Suelo compacto; b) Suelo suelto</i> (Corte & Higashi, 1960)	41
Figura 2.4 - Contenido de agua versus deformación por contracción para el suelo "Indian Head Till". <i>Test S01, contenido de agua inicial 37,7%, Test S02, contenido de agua inicial 31%</i> . (Lau, 1987)	42
Figura 2.5 - Contenido de agua versus deformación por contracción para el suelo "Regina Clay". <i>Test S03, contenido de agua inicial 80%</i> (Lau, 1987)	43
Figura 2.6 - Tiempo en horas versus deformación vertical promedio (Lau, 1987).....	44
Figura 2.7 - Ensayo de desecación sin restricción: <i>a) Contracción inicial; b) Arqueo final a las 65.5 horas de la arcilla de Werribee</i> (Nahlawi & Kodikara, 2002)	46
Figura 2.8 - Curvas de secado de ensayos 1a y 3b. <i>w_t es la humedad en la superficie superior de la muestra, w_l es la humedad en la superficie inferior de la muestra</i> Nahlawi & Kodikara (2002)	46

Figura 2.9 - Ensayos de desecación en muestras con forma de doble T. <i>Izquierda: Forma de los moldes para ensayos de desecación en Moldes Pequeño y Micro. Derecha: a) Fuerzas que provocan el agrietamiento por desecación; b) Grietas primarias, secundarias y terciarias</i> (Ávila, 2004)	47
Figura 2.10 - Patrón de agrietamiento final de la arcilla de Werribee del test 3 (<i>tiempo de desecación 147.75 horas</i>) (Nahlawi & Kodikara, 2006)	49
Figura 2.11 - Proceso de agrietamiento en el ensayo 4 de la arcilla de Werribee (Nahlawi & Kodikara, 2006)	49
Figura 2.12 - Ejemplo de patrón final de agrietamiento (Peron, et al., 2009)	50
Figura 2.13 - Resultados de experimentos en laboratorio de la desecación en muestras sin restricción. <i>(a) Evolución del contenido gravimétrico de agua con el tiempo; (b) Distribución del contenido de agua durante ensayo de desecación</i> (Peron, et al., 2009)	51
Figura 2.14 - Resultados de experimentos en laboratorio de la desecación en muestras sin restricción. <i>(a) Evolución de la deformación con el contenido gravimétrico de agua, ensayo FC; (b) Evolución de la relación de vacíos y la deformación con el contenido de agua</i> (Peron, et al., 2009)	51
Figura 2.15 - Curva de retención: <i>(a) Biolet Silt, (b) Sion Silt, and (c) La Frasse Clay</i> (Peron, et al., 2009)	52
Figura 2.16 - Patrón final de grietas de especímenes rectangulares. (Lakshmikantha, 2009)	54
Figura 2.17 - Evolución de varios parámetros con el tiempo. <i>Muestra circular de 40 cm de diámetro x 10 cm de altura bajo condiciones abiertas de laboratorio.</i> (Lakshmikantha, 2009)	54
Figura 2.18 - Relación entre el contenido de humedad y la resistencia a tracción. (Lakshmikantha, 2009)	56
Figura 2.19 - Efecto del espesor de los especímenes: <i>(a) Variación del contenido de humedad con el tiempo; (b) Área promedio de las celdas vs. Espesor de la muestra (3, 5, 10 y 20 mm), distancia de las lámparas (50, 75, 350, 500 y 750 mm)</i> (Costa, et al., 2013)	57
Figura 2.20 - Ensayo de Desecación en el campo: <i>Izquierda: Forma de la excavación para el ensayo de campo. Derecha: Etapas de formación de grietas por desecación</i> (Konrad & Ayad, 1997a)	59
Figura 2.21 - Profundidad de grieta para MFLE (Morris, et al., 1992)	63
Figura 2.22 - Envolvente de falla a tracción, mostrando el efecto de la succión sobre la resistencia a tracción (Morris, et al., 1992)	63
Figura 2.23 - Esquema de la condición de falla basada en la solución de Rankine (Morris, et al., 1992)	65
Figura 2.24 - Características típicas de retracción de suelos arcillosos (Bronswijk, 1988).	67
Figura 2.25 - Distintos modos de fractura: <i>Izquierda: Descripción esquemática de la formación de planos de corte horizontales por desecación modo II (cizallamiento). Derecha: Tensiones en inmediaciones de la punta de la grieta en modo I (apertura)</i>	67
Figura 2.26 - Factor de intensidad de tensiones y propagación de grieta MFLE	69
Figura 2.27 - Diagrama de flujo del modelo propuesto (Konrad & Ayad, 1997b)	71
Figura 2.28 - Ilustración esquemática del agrietamiento (Konrad & Ayad, 1997b)	72
Figura 2.29 - Patrones de agrietamiento posibles en una superficie plana (Corte & Higashi, 1960)	74
Figura 2.30 - Efecto del espesor de la muestra: <i>a) Numero de lados de las celdas para diferentes espesores; b) Numero de lados de celdas para distintas compactaciones</i> (Corte & Higashi, 1960)	74

Figura 2.31 - Mecanismo propuesto de propagación: (a) <i>Antes de propagar la grieta</i> ; (b) <i>después de propagar la grieta</i> (Lee & K.W. Lo, 1988)	78
Figura 2.32 - Perfiles idealizados de deformación y tensión por retracción: (a) <i>aqueo hacia arriba</i> ; (b) <i>arqueo hacia abajo</i> (Kodikara, et al., 2004).....	82
Figura 2.33 - Curva de retención del suelo (<i>Arcilla de Werribee</i>) (Kodikara, et al., 2004).....	82
Figura 2.34 - Modulo de succión vs succión (Kodikara, et al., 2004).....	83
Figura 2.35 - Valores estimados de succión en las superficies superior e inferior de la muestra bajo <i>40% de humedad relativa y 18°C de temperatura</i> (Kodikara, et al., 2004)..	83
Figura 2.36 - Etapas de simulación del arqueo con el programa FLAC (Kodikara, et al., 2004).....	84
Figura 2.37 - Espécimen bajo desecación en atmósfera de laboratorio de <i>40 mm de alto y 250 mm de diámetro</i> . Comparación entre lo observado y la simulación: (a) <i>Deformación Vertical</i> , (b) <i>Perdida de agua con el Tiempo</i> (Rodríguez, et al., 2007).....	87
Figura 2.38 - Espécimen en desecación en contenedor cerrado <i>225 mm de diámetro y 16 mm de alto</i> : (a) <i>Evolución del contenido gravimétrico de agua</i> , (b) <i>Evolución de la tensión horizontal y la resistencia a tracción</i> (Rodríguez, et al., 2007).....	88
Figura 2.39 - Resultados de la simulación de residuo minero: (a) <i>Evolución de la tensión horizontal a diferentes profundidades y tiempos vs la succión y la resistencia a tracción horizontal</i> ; (b) <i>Distribución de la tensión horizontal en diferentes tiempos, valores negativos indican tracción</i> (Rodríguez, et al., 2007).....	89
Figura 2.40 - Resultados de los ensayos: a) <i>Resistencia a tracción vs contenido de agua</i> ; b) <i>Resistencia a tracción vs succión</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	91
Figura 2.41 - Equipo para ensayo a tracción. <i>Longitud de la muestra 223mm</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	91
Figura 2.42 – Resultados de los ensayos a tracción para distintas humedades (Trabelsi, et al., 2012).....	92
Figura 2.43 - Curva de retención de la arcilla de <i>Beja, Túnez</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	93
Figura 2.44 - Evolución temporal: a) <i>Crack Intensity Factor, CIF</i> ; b) <i>Lenght Fisure Density, LF</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	94
Figura 2.45 - Evolución de la succión con el tiempo (Trabelsi, et al., 2012).....	94
Figura 2.46 - Criterio de Mohr-Coulomb (Trabelsi, et al., 2012).....	95
Figura 2.47 - Resistencia a tracción vs porosidad (Trabelsi, et al., 2012).....	96
Figura 2.48 – Resultados de la simulación: (a) <i>Evolución de la porosidad con el tiempo</i> ; (b) <i>Evolución de la deformación plástica</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	99
Figura 2.49 – Resultados de la simulación: (a) <i>Evolución de la cohesión con el tiempo</i> ; (b) <i>Evolución de la tensión de tracción</i> (Trabelsi, et al., 2012).....	99
Figura 2.50 - Juntas asignadas al modelo para el Test 1 (Amarasiri, et al., 2011).....	101
Figura 2.51 - Curva de retención de la arcilla de Werribee (Amarasiri, et al., 2011).....	103
Figura 2.52 – Resistencia a tracción y al corte: (a) <i>Variación de la resistencia a tracción con el contenido de humedad</i> ; (b) <i>Resistencia al corte en la interface</i> (Amarasiri, et al., 2011).....	103
Figura 2.53 – Comparación de los resultados numéricos y de laboratorio: (a) <i>Evolución de grietas ensayo 3</i> ; (b) <i>Evolución de grietas ensayo 5</i> (Amarasiri, et al., 2011).....	103
Figura 2.54 - Cambios de contenido de humedad y tasa de evaporación en ensayo de desecación (Sima, et al., 2013).....	106
Figura 2.55 – Ensayo y Modelo: (a) <i>Aspecto final de la muestra luego de la desecación</i> ; (b) <i>Modelo en DEM</i> (Sima, et al., 2013).....	107
Figura 2.56 - Resultados experimentales y numéricos (Sima, et al., 2013).....	108

Figura 2.57 – Comparación de resultados experimentales con los resultados del modelo: (a) Cambios en la tasa de superficie de grietas; (b) Cambios en la longitud por unidad de área (Sima, et al., 2013).....	109
Figura 3.1 - GPR: a) Muestra de suelo en bandeja circular 80 cm de diámetro y 10 cm de altura, placa de metacrilato con cuadrícula de 30x30 cm y Georadar; b) Equipo de Georadar StructureScan Mini de GSSI	119
Figura 3.2 - Muestra de suelo. (80 cm de diámetro x 10 cm de altura) y placa de metacrilato con grilla de trabajo (30 cm x 30 cm, calles cada 5 cm).....	120
Figura 3.3 - Evolución de la muestra durante 36 días bajo desecación y agrietamiento. Vista de la cara superior.....	122
Figura 3.4 - Perfil de post-proceso típico del software online StructureScan Viewer...	123
Figura 3.5 - Trayectoria 1 horizontal de recorrido del GPR. Día 22 de desecación. Recorrido de izquierda a derecha.....	124
Figura 3.6 - Distintas opciones de postproceso del equipo. De izquierda a derecha: Rainbow, grayscale black white, grayscale white black, gray glow y positive peak only.....	125
Figura 3.7 - Distintas opciones de postproceso del equipo. De izquierda a derecha: Muted negative peaks, blue white red, deepblue white red, blue white darkred y gray red green blue.....	125
Figura 3.8 - Evolución de un perfil de la muestra para los días 1, 8, 15, 22, y 29.....	126
Figura 3.9 - Perfil obtenido en trayectoria1 el día 21.....	127
Figura 3.10 - Perfil obtenido en trayectoria1 el día 22.....	127
Figura 3.11 - Perfil obtenido en trayectoria 3 el día 22.....	129
Figura 3.12 - Perfil obtenido en trayectoria 4 el día 22.....	129
Figura 3.13 - Perfiles de las 14 trayectorias el día 20.....	131
Figura 3.14 - Anomalías en planta día 20. Grietas visibles el día 22.....	131
Figura 3.15 - Aspecto de las grietas visibles el día 28 y 36.....	131
Figura 3.16 - Aspecto de los perfiles de las 14 trayectorias colocadas en conjunto mediante el software de post-proceso RADAN 6.6.....	133
Figura 3.17 - Imagen 3D obtenida mediante RADAN 6.6.....	133
Figura 3.18 - Perfiles perpendiculares graficados con RADAN 6.6.....	134
Figura 3.19 - Puntos de estudio sobre una grieta de la muestra de suelo.....	134
Figura 3.20 - Intersecciones de perfiles en los puntos de estudio.....	135
Figura 3.21 - Aspecto final de la muestra luego de los ensayos con GPR.....	135
Figura 3.22 – Influencia del tamaño de partículas inicial: (a) Aspecto inicial de la bandeja con lodo semifluido; (b) Aspecto luego de la desecación durante 5 días.....	138
Figura 3.23 – Influencia del tamaño de partículas inicial: (a) Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 40 (0.42 mm de paso); (b) Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N°140 (0.104 mm de paso).....	139
Figura 3.24 – Detalle: Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 40 (0.42 mm de paso).....	141
Figura 3.25 – Detalle: Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N°140 (0.104 mm de paso).....	141
Figura 3.26 - Análisis de imágenes de la muestra de suelo con tamaño máximo de suelo seco utilizado de 0.104 mm.....	142

Figura 3.27 - Bandejas tamaño A2, secadas al mismo tiempo. <i>10.62% y 9.78% de la superficie son grietas para la bandeja con y sin división respectivamente. En la Figura se muestran los porcentajes de grietas de cada porción en correspondencia...</i>	143
Figura 3.28 - Comparación de bandejas con y sin subdivisiones. <i>Los números indican el número de celdas en la bandeja.....</i>	145
Figura 3.29 - Bandeja subdividida en 9 paños de altura constante. <i>De arriba hacia abajo: ancho entre varilla, relación de lados de la porción y número de celdas.....</i>	147
Figura 3.30 - Bandeja tamaño A2, 1 cm de espesor, 6 días de secado. <i>De arriba hacia abajo: ancho entre varillas, relación de lados y número de franjas horizontales.....</i>	147
Figura 3.31 - Relación de lados de las 9 porciones y número de celdas de cada porción. <i>7.81% de la superficie son grietas, dimensiones en milímetros.....</i>	148
Figura 3.32 - Muestra de suelo 40 cm de diámetro x 10 cm de altura sometida a secado rápido.....	150
Figura 3.33 - Grieta central en Muestra de 40 cm de diámetro x 10 cm de altura sometida a secado rápido.....	150
Figura 3.34 - Aspecto al final del ensayo cara superior.....	151
Figura 3.35 - Aspecto al final del ensayo cara inferior.....	151
Figura 3.36 - Mediciones de la deformación en la muestra desecada.....	152
Figura 3.37 - Grietas desde el fondo que no progresaron hasta la superficie.....	152
Figura 3.38 - Instrumentación de la muestra de suelo sometida a ciclos de secado y humedecimiento. <i>80 cm de diámetro x 10 cm de altura (50,27 litros).....</i>	155
Figura 3.39 - Humidificador conectado a la cámara ambiental.....	156
Figura 3.40 - Nueva instrumentación de la Cámara Ambiental: Izquierda: humidostato que controla el humidificador y dehumidificador. Derecha: Dataloger de los sensores Decagon.....	157
Figura 3.41 - Cámara Ambiental mejorada con equipamiento para humidificación: Humidificador, humidostato y tubo evaporador.....	157
Figura 3.42 - Primeros 12 días de desecación en cámara ambiental. <i>Dos auscultaciones con GPR y aparición de la primera grieta visible en superficie.....</i>	162
Figura 3.43 - Desecación, humedecimiento e inundación de la muestra de suelo. <i>Auscultación con GPR números 3 y 4. Grietas debido a inundación.....</i>	163
Figura 3.44 - Última etapa de desecación.....	164
Figura 3.45 - Temperatura en el suelo medida con sensores Decagon.....	165
Figura 3.46 - Medidas de succión mediante tensiómetros T5x.....	165
Figura 3.47 - Humedad relativa y temperatura del ambiente.....	166
Figura 3.48 - Medición de las células de carga.....	166
Figura 3.49 - Resultado de escaneo con Georadar – GPR1 - Día 3.....	167
Figura 3.50 - Resultado de escaneo con Georadar – GPR2 - Día 9.....	167
Figura 3.51 - Resultado de escaneo con Georadar – GPR3 - Día 14.....	168
Figura 3.52 - Resultado de escaneo con Georadar – GPR4 - Día 20.....	168
Figura 4.1 - Superficies de Estado, de (Matyas, et al., 1968).....	183
Figura 4.2 - Campo de succión: <i>Elemento lineal de 3 nodos.....</i>	209
Figura 4.3 - Campo de desplazamientos: <i>Elemento triangulo lineal.....</i>	211
Figura 4.4 - Campo de desplazamientos: <i>Elemento triangulo cuadrático.....</i>	218

Figura 4.5 - Sección rectangular de la bandeja prismática de pequeño espesor que se estudia numéricamente. Las condiciones de contorno en desplazamiento se aplican a los borde de la sección en contacto con la bandeja. La condición de contorno en succión se aplica al borde de la sección en contacto con el ambiente.....	224
Figura 4.6 - Sección radial de una muestra cilíndrica de base circular que se estudia mediante el modelo numérico bidimensional. Las condiciones de contorno en desplazamiento se aplican a los borde de la sección en contacto con la bandeja. La condición de contorno en succión se aplica al borde de la sección en contacto con el ambiente.....	224
Figura 4.7 - Esquemas utilizados para analizar la influencia de las condiciones de contorno en succión y desplazamientos en el problema de desecación de suelos.....	228
Figura 4.8 - Esquemas utilizados para analizar la influencia de grietas centrales en la desecación de suelos.....	229
Figura 4.9 - Esquemas utilizados para analizar la influencia del arqueo en muestras sometidas a desecación.....	229
Figura 4.10 - Esquemas utilizados para analizar el caso de secado rápido.....	229
Figura 4.11 - Criterio utilizado para tratar en inicio de agrietamiento, a) Resistencia a Tracción en función del contenido de humedad (Lakshmikantha, 2009); b) Criterio de Rotura de la Resistencia de Materiales Clásica.....	231
Figura 4.12 - Modos de deformación de grietas (Norma UNE 7540:1998).....	232
Figura 4.13 - Esquema de separación de Nodos: a) <i>en el contorno</i> ; b) <i>caso general</i>	233
Figura 4.14 - Simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja. a) <i>Campo de succión luego de 60 días de desecación</i> ; b) <i>Tensión horizontal en la matriz de suelo luego de 60 días de desecación</i>	235
Figura 4.15 - Resultados de la simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja: a) <i>Evolución del grado de saturación S_r, contenido volumétrico de agua θ, permeabilidad relativa k_r</i> ; b) <i>Evolución de la succión en el punto de referencia (cruz blanca sobre el campo de succión de la Figura 4.14a); ; c) Evolución de las tensiones horizontales y verticales en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde abajo de la Figura 4.14b</i> ; d) <i>Tensión media vs deformación volumétrica en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b</i>	236
Figura 4.16 - Resultados de la simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja: a) <i>Evolución de la porosidad n en el punto de referencia (cruz blanca de la Figura 4.14a)</i> ; b) <i>Evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b</i> ; c) <i>Relación tensión-deformación en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b</i> ; d) <i>Relación entre tensión tangencial y tensión media en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b</i>	237
Figura 4.17 - Esquema de tipos de fractura.....	239
Figura 4.18 - Factor de intensidad de tensiones y propagación de grieta de acuerdo a MFLE.....	241
Figura 4.19 - Comportamiento de rocas sometidas a ensayos de tracción (Ingraffea, 1989).....	242
Figura 4.20 - Diagrama de flujo del modelo propuesto.....	245
Figura 4.21 - (a) Diferenciación de tres zonas en las cercanías de una grieta; (b) Zona circular en la punta de la grieta.....	247

Figura 5.1 - Dsecación con restricciones mínimas: <i>a) Esquema del problema considerando deformación plana: desplazamientos fijos en el centro de la sección, succión de 30 MPa aplicada en todo el contorno; b) Malla de elementos finitos. Se observa que los nodos no corresponden exactamente con los puntos de referencia elegidos para el análisis. Dimensiones de los ejes en metros.</i>	253
Figura 5.2 - Evolución de la succión durante el proceso de dsecación en un cilindro de suelo considerando deformación plana. <i>(La circunferencia roja exterior indica la dimensión original de la sección circular).</i>	254
Figura 5.3 - Evolución de la succión con el tiempo en el centro de la sección circular....	255
Figura 5.4 - Dsecación con restricciones mínimas: <i>(a) Tensiones normales (MPa) en función del tiempo; (b) tensión neta media (MPa) en función de la deformación volumétrica.</i>	257
Figura 5.5 - Dsecación con restricciones mínimas: <i>(a) Relación tensión (MPa)-deformación en los nodos de referencia; (b) desplazamientos (m) en los nodos de referencia en función del tiempo.</i>	257
Figura 5.6 - Simulación de cilindro de suelo después de 5 días de secado. <i>Campo de Succión en MPa, Tensiones Horizontales y Tensiones Verticales en MPa. Dimensiones de los ejes en metros.</i>	259
Figura 5.7 – Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro x 20 cm de altura. <i>Sección radial de 20 cm x 20cm (en amarillo) sobre la que se analiza numéricamente el efecto de las condiciones de contorno sobre la retracción del suelo debido a dsecación.</i>	262
Figura 5.8 – Representación de las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión. <i>La línea roja indica donde se impone la succión constante e igual a 60 MPa durante el proceso de dsecación de 40 días. El borde vertical izquierdo es un eje de simetría axial.</i>	263
Figura 5.9 – Esquema CC01-PC01: <i>a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.</i>	265
Figura 5.10 – Esquema CC01-PC02: <i>a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.</i>	266
Figura 5.11 – Esquema CC02-PC01: <i>a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.</i>	268
Figura 5.12 – Esquema CC03-PC01: <i>a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.</i>	271
Figura 5.13 – Esquema CC11-PC01: <i>a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.</i>	272

Figura 5.14 - Esquema CC11-PC06: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.....	274
Figura 5.15 – Esquema CC15-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.....	276
Figura 5.16 – Esquema CC09-PC02: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.....	277
Figura 5.17 - Esquema CC08-PC04: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.....	278
Figura 5.18 – Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro × 20 cm de altura. Sección diametral de 40 cm × 20cm (en azul) sobre la que se analiza numéricamente la influencia de una grieta central.....	282
Figura 5.19 – Esquemas utilizados para la simulación con la geometría de la Figura 5.18 y grieta central de 1, 5, 10, 15 y 19 cm de profundidad.....	283
Figura 5.20 – Influencia de la profundidad de una grieta central en los campos de succión y tensiones horizontales y verticales después de 40 días de secado. Nodo de referencia sobre el campo de succión indicado por una cruz blanca en las inmediaciones de la grieta.....	283
Figura 5.21 – Influencia de la profundidad de la grieta: (a) Influencia del tamaño de la grieta en: grado de saturación S_r , contenido volumétrico de agua θ y permeabilidad relativa k_r ; (b) Influencia del tamaño de la grieta en la variación de la succión en el nodo de referencia.....	285
Figura 5.22 - Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro × 10 cm de altura. Sección de 20 cm × 10 cm (en amarillo) sobre la que se analiza numéricamente el efecto de las grietas laterales en la desecación de suelos. Los puntos de referencia usados para el análisis se indican en blanco.....	286
Figura 5.23 - Comparación de la evolución de la succión para tres casos de desecación, esquemas: CC02-PC01, CC09-PC02 y CC08-PC04. El nodo 116 es el nodo central en la figura (coordenadas: 0.1 m, 0.05 m), línea azul, el nodo 226 es el nodo en medio de la línea vertical izquierda de la sección radial en estudio, línea roja (coordenadas: 0, 0.05).....	288
Figura 5.24 - Efecto de las grietas laterales: a), c) y e): Evolución del volumen de la muestra de suelo; b), d) y f): Evolución de la porosidad en dos puntos de referencia.....	290
Figura 5.25 - Grado de saturación (columna izquierda) y tensión horizontal (columna derecha) a 40 días de desecación para los esquemas CC02-PC01, CC01-PC02 y CC08-PC04.....	291
Figura 5.26 - Resultados de la simulación para el caso sin grietas. Esquema CC02-PC01: a) Evolución de las tensiones con el tiempo; b) Evolución de los desplazamientos.....	292
Figura 5.27 – Resultados de la simulación del caso con grieta vertical en contacto con la pared de la bandeja. Esquema CC09-PC02: a) evolución de las tensiones con el tiempo; b) evolución de los desplazamientos.....	293

Figura 5.28 - Resultado de la simulación del caso con grieta vertical en contacto con la pared de la bandeja y horizontal en contacto con el fondo de la bandeja. Esquema CC08-PC04: a) <i>evolución de las tensiones con el tiempo</i> ; b) <i>evolución de los desplazamientos</i> .	293
Figura 5.29 – Arcilla de Werribee: a) <i>contracción inicial isótropa</i> ; b) <i>arqueo final a las 65.5 horas</i> . (Nahlawi & Kodikara, 2002).	297
Figura 5.30 - Curvas de secado de ensayos 1a y 3b de Nahlawi & Kodikara (2002). w_t es la humedad en la superficie superior de la muestra y w_l es la humedad en la superficie inferior de la muestra.	298
Figura 5.31 - Arcilla de Werribee: a) <i>curva de retención para las muestras 1 y 2</i> (Kodikara, et al., 2004); b) <i>succión matricial vs deformación</i> (Nahlawi & Kodikara, 2002).	299
Figura 5.32 - Variación del módulo de succión, H , en función de la succión matricial (Nahlawi & Kodikara, 2002).	300
Figura 5.33 – Módulo de succión vs succión (Kodikara, et al., 2004).	302
Figura 5.34 – Valores estimados de succión en las superficies superior e inferior de la muestra con 40% de humedad relativa y 18°C de temperatura (Kodikara, et al., 2004).	302
Figura 5.35 – Simulaciones usando el programa FLAC. <i>Espesores de la muestra en las principales etapas del proceso</i> (Kodikara, et al., 2004).	303
Figura 5.36 – Simulaciones usando el código en MATLAB: a, b) <i>contracción isótropa</i> ; c, d) <i>arqueo cóncavo</i> ; e, f) <i>arqueo convexo</i> .	307
Figura 5.37 – Resultados de la simulación de la contracción isótropa de la arcilla de Werribee en los puntos de referencia (azul, rojo y verde): a) <i>evolución de las tensiones</i> ; b) <i>relación tensión media vs deformación volumétrica</i> .	308
Figura 5.38 – Resultados de la simulación de la contracción isótropa de la arcilla de Werribee en el punto de referencia blanco: a) <i>evolución del grado de saturación S_r, permeabilidad relativa k_r y contenido volumétrico de humedad θ</i> ; b) <i>evolución de la presión de poros</i> .	308
Figura 5.39 – Resultados de la simulación de la contracción isótropa de la arcilla de Werribee en los puntos de referencia (azul, rojo y verde): a) <i>relación tensión-deformación</i> ; b) <i>evolución de los desplazamientos</i> .	309
Figura 5.40 – Resultados de la simulación de la contracción isótropa de la arcilla de Werribee en el punto de referencia blanco: a) <i>evolución de la porosidad en el tiempo</i> ; b) <i>evolución del índice de poros con la presión</i> .	309
Figura 5.41 - Bandejas circulares para muestras cilíndricas de suelo utilizadas en los análisis de esta tesis: a) <i>80 cm de diámetro \times 20 cm de altura</i> ; b) <i>40 cm de diámetro \times 10 cm de altura</i> ; c) <i>80 cm de diámetro \times 10 cm de altura</i> ; d) <i>80 cm de diámetro \times 10 cm de altura con fondo liso</i> .	313
Figura 5.42 – a) Cara superior de la muestra de suelo de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura desecada en ambiente de laboratorio durante 110 días. Se observa la ubicación en planta de los dos sensores Vaisala, V1-V2 y los cuatro tensiómetros, T1, T2, T3 y T4; b) Cara inferior; se indica la grieta radial que pudo afectar las mediciones del sensor Vaisala V2 (Lakshmikantha, 2009).	314
Figura 5.43 – Evolución de las variables durante el ensayo de desecación en muestra de suelo cilíndrica de 40 cm de diámetro y 10 cm de altura: a) <i>temperatura del aire y el suelo, humedad relativa del aire y del suelo, pérdida de humedad del suelo durante el ensayo</i> ; b) <i>evolución de la succión en el suelo durante el ensayo</i> (Lakshmikantha, 2009).	315

Figura 5.44 – Cara superior e inferior de muestra de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura después de ser desecada en cámara ambiental durante 45 días (Lakshmikantha, 2009).....	316
Figura 5.45 - Evolución de las variables durante el ensayo de desecación en muestra de suelo cilíndrica de 40 cm de diámetro y 10 cm de altura: <i>a) temperatura del aire y el suelo, humedad relativa del aire y del suelo, perdida de humedad del suelo durante el ensayo; b) evolución de la succión en el suelo durante el ensayo</i> (Lakshmikantha, 2009).....	317
Figura 5.46 – Aspecto final de la muestra sometida a secado rápido.....	319
Figura 5.47 – Aplicación de condiciones de contorno que fuerzan el secado rápido.....	319
Figura 5.48 – Grietas al final del ensayo de secado rápido: <i>a) Grietas de Tipo 1 (se propagan toda la altura de la muestra y están bien definidas. Son prácticamente verticales; b y c) Grietas de tipo 2 (curvas, no alcanzan a propagarse toda la altura de la muestra. Pueden ser verticales u oblicuas)</i>	322
Figura 5.49 – Aspecto de la cara inferior de la muestra al final del ensayo de secado rápido. Sección estudiada numéricamente.....	324
Figura 5.50 – Esquemas utilizados para el análisis de desecación en muestra de suelo de 40 cm de diámetro × 10 cm de altura. La geometría se corresponde con una sección diametral de la muestra cilíndrica.....	324
Figura 5.51 – Valores de succión aplicados como condición de contorno del esquema CC18-PCC.....	324
Figura 5.52 – Deformación del esquema CC14-PCA a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensión vertical; f) tensión principal mayor</i>	326
Figura 5.53 – Esquema CC14-PCA (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica</i>	328
Figura 5.54 – Esquema CC14-PCA: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia azul, rojo y verde</i>	329
Figura 5.55 – Deformación del esquema CC02b-PCA a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensión vertical; f) tensión principal mayor</i>	330
Figura 5.56 – Esquema CC02b-PCA (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica</i>	331
Figura 5.57 – Esquema CC02b-PCA: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde</i>	332
Figura 5.58 – Deformación del esquema CC18-PCB a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor</i>	333
Figura 5.59 – Esquema CC18-PCB (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica</i>	334
Figura 5.60 – Esquema CC18-PCB: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde</i>	335

Figura 5.61 – Deformación del esquema CC18-PCC a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.....</i>	336
Figura 5.62 – Esquema CC18-PCC (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.....</i>	337
Figura 5.63 – Esquema CC18-PCC: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.....</i>	338
Figura 5.64 – Deformación del esquema CC18-PCD a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.....</i>	340
Figura 5.65 – Esquema CC18-PCD (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.....</i>	341
Figura 5.66 – Esquema CC18-PCD: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.....</i>	342
Figura 5.67 – Deformación del esquema CC18-PCE a seis días de secado: <i>a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.....</i>	343
Figura 5.68 – Esquema CC18-PCE (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): <i>a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.....</i>	344
Figura 5.69 – Esquema CC18-PCD: <i>a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.....</i>	345
Figura 5.70 – Cara superior e inferior de una muestra de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura después de ser desecada en la cámara ambiental durante 38 días (Lakshmikantha, 2009).....	349
Figura 5.71 – Evolución de la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y humedad relativa del suelo y pérdida de humedad del suelo. <i>Muestra 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo rugoso, secada en cámara ambiental</i> (Lakshmikantha, 2009)...	350
Figura 5.72 – Evolución de la succión y de la humedad. <i>Muestra de suelo de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo rugoso, sometida a desecación en cámara ambiental</i> (Lakshmikantha, 2009).....	351
Figura 5.73 – Distribución de tensiómetros (T) y sensores Vaisala (V). <i>Bandeja de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo liso, secada en cámara ambiental</i> (Lakshmikantha, 2009).....	352
Figura 5.74 – Cara superior e inferior. <i>Muestra de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo liso, después de ser desecada en cámara ambiental durante 34 días</i> (Lakshmikantha, 2009).....	352
Figura 5.75 – Evolución de la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y humedad relativa del suelo y pérdida de humedad del suelo. <i>Muestra de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo liso, secada en cámara ambiental</i> (Lakshmikantha, 2009).....	353
Figura 5.76 – Evolución de la succión y de la humedad. <i>Muestra de suelo de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, fondo liso, sometida a desecación en cámara ambiental</i> (Lakshmikantha, 2009).....	353

Figura 5.77 – a) Cara superior de la muestra; b) cara inferior de la muestra: 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, fondo liso, después de ser desecada en ambiente de laboratorio durante 36 días.....	355
Figura 5.78 – Secuencia del agrietamiento. Muestra de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, fondo liso, luego de ser desecada en ambiente de laboratorio durante 36 días....	356
Figura 5.79 – Pérdida de humedad y succión vs tiempo. Muestra cilíndrica de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura. (Lakshmikantha, 2009).....	359
Figura 5.80 - Esquema CC02-PC01. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales.....	361
Figura 5.81 - Esquema CC02-PC01: a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.19a.....	362
Figura 5.82 - Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC02-PC01: a) grado de saturación, permeabilidad relativa y contenido volumétrico de agua en función del tiempo; b) relación tensión-deformación; c) tensión en función del tiempo; d) tensión media vs deformación volumétrica.....	363
Figura 5.83 – Esquema CC03-PC01. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales.....	364
Figura 5.84 – Esquema CC03-PC01: a) variación de succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.22a.....	365
Figura 5.85 - Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC03-PC01: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; d) tensión media vs deformación volumétrica.....	365
Figura 5.86 - Esquema CC03-PC01 y grieta lateral parcialmente propagada. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales.....	367
Figura 5.87 – Esquema CC03-PC01 con grieta lateral parcialmente propagada: a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco Figura 5.25a.....	368
Figura 5.88 - Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC03-PC01 con grieta lateral parcialmente propagada: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.....	368
Figura 5.89 – Esquema CC09-PC02. Simulación después de 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales.....	370
Figura 5.90 – Esquema CC09-PC02 con grieta lateral parcialmente propagada: a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.28a.....	371
Figura 5.91 – Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC09-PC02 con grieta lateral parcialmente propagada: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.....	371
Figura 5.92 – Evolución del agrietamiento de la muestra de 80 cm de diámetro \times 20 cm de altura (Lakshmikantha, 2009).....	374

Figura 5.93 – Resultado de laboratorio sobre muestra circular de 80 cm × 20 cm (Lakshmikantha, 2009).....	375
Figura 5.94 – Evolución de la succión y el contenido de humedad en la muestra de 80cm×20cm (Lakshmikantha, 2009).....	378
Figura 5.95 – Simulación sin grietas el día 120: a) <i>Campo de succión en MPa</i> ; b) <i>Campo de tensiones horizontales en MPa</i> ; c) <i>Campo de tensiones tangenciales en el plano XY en MPa</i> ; d) <i>Campo de tensiones medias en MPa</i>	379
Figura 5.96 – Resultados del ensayo de desecación considerando que no hay grietas; a) <i>Evolución de la humedad global de la muestra (%) con el tiempo en días</i> ; b) <i>Succión en los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde)</i> ; c) <i>Evolución de las tensiones en los puntos de referencia</i> ; d) <i>Relación tensión media vs deformación volumétrica en los puntos de referencia</i> ; e) <i>Evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia</i> ; f) <i>Relación tensión-deformación en los puntos de referencia</i>	381
Figura 5.97 – Resultados del ensayo de desecación considerando que no hay grietas: a) <i>campo de succión el día 120</i> ; b) <i>campo de tensión horizontal el día 120</i> ; c) <i>evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo en los puntos de referencia</i> ; d) <i>evolución de la succión en los puntos de referencia</i> ; e) <i>relación tensión-deformación en los puntos de referencia</i> ; f) <i>evolución de la tensión tangencial en el plano XY en los puntos de referencia</i>	382
Figura 5.98 – a) y b) <i>Resistencia a tracción vs humedad</i> ; c) <i>resistencia a tracción vs humedad incluyendo todos los ensayos</i> ; d) <i>resistencia a tracción vs grado de saturación</i> (Lakshmikantha, 2009).....	384
Figura 5.99 – Evolución del campo de succión durante secado y propagación de una grieta en el borde derecho en contacto con la bandeja contenedora: a) <i>succión y grieta lateral a 7 días de secado</i> ; b) <i>succión y grieta lateral a 12 días de secado</i> ; c) <i>succión y grieta lateral a 37 días de secado</i> ; d) <i>succión y grieta lateral a 62 días de secado</i> ; e) <i>succión y grieta lateral a 72 días de secado</i> ; f) <i>succión y grieta lateral a 120 días de secado</i>	385
Figura 5.100 – Simulación de ensayo con agrietamiento: a) <i>evolución de la humedad de la muestra en el tiempo</i> ; b) <i>evolución de la succión en tres puntos de la sección radial</i> ...	386

FIGURAS ANEXOS

Figura A.1 - Relación entre Módulo de Elasticidad E y el Grado de Saturación de agua del Suelo.....	II
Figura A.2 - Relación entre los Coeficientes Elásticos d_{11} , d_{12} y G Adoptando $E=1000$	II
Figura A.3 - Relación entre los Coeficientes Elásticos c_1 , c_2 , c_3 y ν Adoptando $E=1000$	III
Figura A.4 - Influencia del parámetro a_2 de la superficie de estado en las propiedades mecánicas del suelo.....	IV
Figura A.5 - Influencia del parámetro a_1 de la superficie de estado en las propiedades mecánicas del suelo.....	V
Figura A.6 - Influencia del Parámetro a_3 de la Superficie de Estado en las Propiedades Mecánicas del Suelo.....	V
Figura B.1 - Influencia de la porosidad en la curva de retención de (VanGenuchten, 1980).....	VIII
Figura B.2 - Influencia del parámetro m en la curva de retención para una porosidad de $n = 0.66$	VIII
Figura B.3 - Influencia del parámetro m en la curva de retención para una porosidad de $n = 0.54$	IX
Figura B.4 - Influencia de la porosidad en la permeabilidad para distintos valores del coeficiente b ó η	IX
Figura C.1 - Métodos de prospección geofísica.....	XII
Figura C.2 - Propagación de ondas en medios distintos.....	XIII
Figura C.3 - Esquema de funcionamiento de georadar.....	XIII
Figura C.4 - Especificaciones técnicas del equipo de georadar StructureScan Mini de GSSI.....	XIV
Figura C.5 – Humidostato EH3 DST.....	XV
Figura C.6 – Especificaciones técnicas del Humidostato EH3 DST.....	XVI
Figura C.7 – Especificaciones técnicas del Humidostato EH3 DST.....	XVII
Figura C.8 – Humidificador Nordmann.....	XVII
Figura C.9 – Especificaciones técnicas del Humidificador Nordmann.....	XVIII

TABLAS	PAG.
Tabla A.1 - Relación entre coeficientes elásticos 1.....	III
Tabla A.2 - Relación entre coeficientes elásticos 2.....	III
Tabla A.3 – Algunos parámetros utilizados en las simulaciones.....	VI
Tabla 2.1 - Características del suelo utilizado por (Corte & Higashi, 1960). “Bloomington Till” (tamaño máx. de partículas 1 mm) en Illinois, USA.....	38
Tabla 2.2 - Arcilla de Werribee (Nahlawi & Kodikara, 2002).....	38
Tabla 2.3 - Características del suelo utilizado en (Peron, et al., 2009).....	38
Tabla 2.4 - Resultados experimentales y numéricos. (Sima, et al., 2013).....	107
Tabla 3.1 - Celdas en bandeja con subdivisiones	144
Tabla 3.2 - Morfología de las grietas en bandeja rectangular con subdivisiones.....	148
Tabla 5.1 – Parámetros utilizados para la simulación de desecación con restricciones mínimas.....	260
Tabla 5.2 – Condiciones de los ensayos de arqueo en (Kodikara, et al., 2004).....	296
Tabla 5.3 – Parámetros utilizados para la simulación de desecación.....	387
Tabla 5.4 – Parámetros de la curva de retención para la arcilla de Barcelona (Barrera, 2002).....	387

Sumario

Cubierta	
Portada	
Resumen.....	i
Abstract.....	iii
Resum.....	v
Prefacio.....	vii
Organización de la Tesis.....	ix
Agradecimientos.....	xi
Abreviaturas, Notación y Símbolos.....	xv
Lista de Ilustraciones y Tablas.....	xxv
Sumario.....	xli
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. El Fenómeno de Deseccación en Suelos.....	3
1.1.1. Deseccación en el Campo.....	4
1.1.2. Deseccación en el Laboratorio.....	9
1.1.2.1. Preparación del Suelo.....	11
1.1.2.2. Particularidades en el Laboratorio.....	13
1.2. Objetivos de la Tesis.....	14
1.2.1. Vertiente Experimental.....	15
1.2.2. Vertiente Teórico-Numérica.....	16
1.3. Campos de Aplicación de la Tesis.....	18
1.4. Definición del Problema de Deseccación en Suelos.....	21
1.5. Alcance de la Tesis.....	22
1.6. Metodología e Hipótesis de Trabajo.....	24
Capítulo 2 Estado del Arte.....	27
2.1. Introducción.....	29
2.2. Definiciones.....	31
2.2.1. Definiciones de Agrietamiento.....	31

2.2.2.	Definiciones de Inicio de Agrietamiento.....	32
2.3.	Vertiente Experimental.....	33
2.3.1.	Primeros Antecedentes.....	34
2.3.1.1.	Retracción de Suelos.....	34
2.3.1.2.	Retracción y Agrietamiento.....	34
2.3.1.3.	Patrón de Agrietamiento.....	35
2.3.1.4.	Espaciado y Profundidad de las Grietas.....	36
2.3.2.	Variables Involucradas y Objetivos de los Estudios Experimentales.....	36
2.3.3.	Tipos de Suelos Utilizados en los Ensayos.....	37
2.3.4.	Tipos de Contenedores.....	39
2.3.5.	Resultados de los Ensayos de Laboratorio.....	40
2.3.5.1.	Retracción y Agrietamiento.....	40
2.3.5.2.	Arqueo (Curling).....	44
2.3.5.3.	Influencia de las Condiciones de Contorno de las Bandejas.....	45
2.3.5.4.	Estudio de Muestras Delgadas.....	48
2.3.5.5.	Ensayos sin Restricción.....	50
2.3.5.6.	Influencia del Espesor de las Muestras.....	53
2.3.5.7.	Evolución de la Deseccación en Muestras Circulares de Gran Tamaño.....	53
2.3.5.8.	Resistencia a Tracción.....	53
2.3.5.9.	Materiales Distintos a la Arcilla y Clasificación de Patrones de Agrietamiento.....	55
2.3.6.	Resultados de los Ensayos en el Campo.....	56
2.3.6.1.	Descripción de la Formación y Propagación de Grietas.....	58
2.4.	Vertiente Teórica.....	59
2.4.1.	Medio Elástico y Mecánica de Fractura Lineal Elástica.....	60
2.4.1.1.	Formulación Basada en la Teoría de la Elasticidad.....	61
2.4.1.2.	Formulación Basada en la MFLE.....	62
2.4.1.3.	Formulación Basada en la Resistencia al Corte.....	62
2.4.2.	Flujo en Medio Poroso y MFLE.....	65
2.4.2.1.	Características de la Retracción en Suelos Arcillosos.....	66
2.4.2.2.	Mecánica de Fractura y Propagación de Grietas.....	66
2.4.2.3.	Descripción General del Modelo de Konrad & Ayad (1997).....	70
2.4.2.4.	Predicción del Perfil de Succiones Durante el Inicio de la Grieta.....	71
2.4.2.5.	Predicción de la Profundidad de la Grieta en el Inicio.....	72
2.4.2.6.	Predicción del Espaciamiento Medio entre las Grietas.....	73
2.4.3.	Interpretación Geométrica de los Patrones de Agrietamiento (Probabilística)...	73
2.4.4.	Interpretación Geo-Mecánica de los Patrones de Agrietamiento (Determinista)	74
2.5.	Vertiente Numérica.....	76
2.5.1.	El Problema de la Fractura en Suelos (Lee & K.W. Lo, 1988).....	77
2.5.1.1.	Criterio de Propagación de Grietas.....	78
2.5.1.2.	Criterio de Iniciación de la Grieta.....	79
2.5.1.3.	Modelo de Elementos Finitos.....	79
2.5.2.	Método de las Diferencias Finitas (FLAC).....	81
2.5.3.	Programa Code_Bright (MEF).....	84
2.5.3.1.	Ecuaciones de Balance del Programa Code_Bright.....	84
2.5.3.2.	Ecuaciones Constitutivas del Modelo Code_Bright.....	85
2.5.3.3.	Resultado del Análisis de Residuos Mineros.....	87
2.5.3.4.	Deseccación del Suelo Arcilloso de Túnez.....	89
2.5.3.4.1.	Experimentos para Determinar la Resistencia a Tracción.....	90
2.5.3.4.2.	Experimentos para Determinar los Patrones de Grietas.....	93

2.5.3.4.3. Nuevo Modelo Basado en el Criterio de Mohr-Coulomb.....	95
2.5.3.4.4. Aproximación Mecánica para Modelar la Contracción y el Agrietamiento.....	96
2.5.3.4.5. Implementación Numérica para Predecir el Agrietamiento.....	98
2.5.3.4.6. Heterogeneidad.....	98
2.5.3.4.7. Resultado de las Simulaciones y Comparación con los Experimentos.....	98
2.5.3.4.8. Evolución de la Porosidad, Deformación Plástica y Tensiones en el Medio Sano y Agrietado.....	98
2.5.4. Método del Elemento Distinto (UDEEC).....	100
2.5.4.1. Descripción del Método del Elemento Distinto.....	100
2.5.4.2. Características y Parámetros del Modelo UDEEC.....	100
2.5.4.3. Simulación de Deseccación, Succión y Desarrollo de Resistencia.....	101
2.5.4.4. Características de la Interface Suelo-Molde.....	102
2.5.4.5. Resultados con UDEEC.....	102
2.5.5. Método del Elemento Discreto (DEM).....	104
2.5.5.1. Modelo de Retracción para la Arcilla de Sima et al. (2013).....	104
2.5.5.2. Experimento de Laboratorio Utilizado.....	105
2.5.5.3. Modelo Usando DEM y PFC3D.....	105
2.5.5.4. Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales.....	106
2.6. Conclusiones del Estado del Arte.....	110
2.6.1. Conclusiones de la Vertiente Experimental.....	110
2.6.1.1. Objetivos de las Investigaciones.....	110
2.6.1.2. Tipos de Suelo que Presentan Retracción y Agrietamiento por Deseccación...	110
2.6.1.3. Fenómenos que Producen Agrietamiento.....	111
2.6.1.4. Características de las Grietas.....	111
2.6.1.5. Factores que Influyen en el Proceso.....	111
2.6.1.6. Características Fundamentales del Agrietamiento.....	112
2.6.1.7. Causas de la Formación de las Grietas.....	112
2.6.1.8. Resistencia a Tracción.....	112
2.6.2. Conclusiones de la Vertiente Teórica.....	112
2.6.3. Conclusiones de la Vertiente Numérica.....	113
 Capítulo 3 Análisis Experimental	 115
3.1. Georadar. Fundamentos del Sistema.....	117
3.1.1. GPR Aplicado a la Auscultación de Suelos en Deseccación y Agrietamiento.....	119
3.1.1.1. Equipo de GPR utilizado para el Ensayo.....	119
3.1.1.2. Auscultación con Georadar (GPR).....	121
3.1.1.3. StructureScan Mini Viewer.....	122
3.1.1.4. Detección de Grietas antes de su Aparición en Superficie.....	130
3.1.1.5. Software RADAN 6.6.....	132
3.1.2. Conclusiones de las Capacidades del Equipo.....	136
3.2. Bandejas Rectangulares.....	137
3.2.1. Influencia del Tamaño Inicial de las Partículas de Suelo.....	137
3.2.2. Análisis de Imágenes.....	140
3.2.3. Influencia de la Relación de Lados de las Bandejas.....	144
3.2.3.1. Ensayo en Bandejas Subdivididas con Marco de Madera.....	144

3.2.3.2. Ensayo en Bandejas Subdivididas con Marco de PVC.....	146
3.3. Ensayo en Bandeja Circular Sometida a Secado Rápido.....	149
3.4. Ensayo de Secado, Humedecimiento e Inundación en Cámara Ambiental.....	154
3.4.1. Descripción de las Mejoras Hechas al Equipo de Laboratorio.....	155
3.4.2. Desarrollo del Ensayo y Descripción de las Distintas Etapas.....	158
3.4.2.1. Primera Etapa (Secado, 14 días).....	158
3.4.2.2. Segunda Etapa (Humedecimiento, 5 días).....	158
3.4.2.3. Tercera Etapa (Inundación, 3 días).....	159
3.4.2.4. Cuarta Etapa (Segundo Secado, 11 días).....	160
3.4.2.5. Quinta Etapa (Segundo Humedecimiento, hasta el final del ensayo).....	161
3.4.2.6. Resultados de la auscultación con Georadar.....	161
3.5. Conclusiones Respecto de los Ensayos de Laboratorio.....	169
 Capítulo 4 Modelo Numérico.....	173
4.1. Introducción.....	175
4.1.1. Hipótesis del Modelo.....	175
4.1.2. Variables de Estado.....	176
4.1.3. Ecuaciones de Gobierno.....	177
4.1.3.1. Condiciones Iniciales del Problema Hidromecánico.....	180
4.1.3.2. Condiciones de Contorno del Problema Hidromecánico.....	180
4.1.3.3. Condiciones de Contorno de Tensión del Problema Hidromecánico.....	181
4.1.3.4. Condiciones de Contorno de Flujo del Problema Hidromecánico.....	181
4.1.4. Modelo Constitutivo Mecánico.....	181
4.1.4.1. Variables de Estado de Tensiones, Deformaciones y Módulos Elásticos no Lineales del Modelo Constitutivo Mecánico.....	184
4.1.4.2. Forma Matricial de la Relación Tensión-Deformación.....	190
4.1.4.3. Convención de Signos.....	192
4.1.5. Modelos Constitutivo Hidráulico. Ley de Darcy.....	192
4.1.5.1. Tensor de Permeabilidad.....	193
4.1.5.2. Curva de Retención.....	193
4.2. Aproximación por el MEF.....	194
4.2.1. El Problema Mecánico.....	194
4.2.1.1. Funciones de Forma para el Problema Mecánico.....	195
4.2.2. El Problema de Flujo no Saturado en Medio Poroso Deformable.....	197
4.2.2.1. Funciones de Forma para el Problema Hidráulico.....	199
4.2.3. Formulación “u-p” del Problema de Flujo en Medio Poroso Deformable.....	201
4.2.4. Discretización Temporal del Problema Acoplado.....	202
4.2.4.1. Estrategia de Implementación.....	203
4.2.4.2. Procedimiento Escalonado para Resolver la Formulación Acoplada.....	204
4.2.5. Discretización Temporal del Problema Desacoplado.....	206
4.2.5.1. Discretización Temporal del Problema Mecánico.....	206
4.2.5.2. Discretización Temporal del Problema Hidráulico.....	207
4.2.6. Matrices del MEF para el Caso de Elementos Triangulares Lineales de 3 Nodos.....	208
4.2.6.1. Campo de Presión de Poros (Succión). Elemento Lineal.....	208
4.2.6.2. Campo de desplazamientos. Elemento Lineal.....	210

4.2.6.3.	Expresiones Matriciales para Elementos Lineales.....	212
4.2.6.4.	Campo de desplazamientos. Elemento Cuadrático.....	217
4.2.6.5.	Expresiones Matriciales para el caso de Combinar Elementos Lineales para la Presión de Poros y Elementos Cuadráticos para los Desplazamientos.....	219
4.3.	Modelo Numérico en MATLAB.....	222
4.3.1.	Proceso de Implementación del Modelo.....	223
4.3.2.	Deformación y Agrietamiento producidos en los Ensayos.....	225
4.3.3.	Posibilidades de Análisis con el Código.....	226
4.3.3.1.	Condiciones de Contorno del Problema de Desección de Suelos.....	227
4.3.4.	Técnica para el Estudio de la Formación y Propagación de Grietas.....	230
4.3.4.1.	Algoritmo de Liberación de Nodos.....	232
4.3.4.2.	Desarrollo de Grietas en el Contorno.....	234
4.4.	Propuesta de Modelo de Mecánica de Fractura para el Inicio y Propagación de Grietas por Desección en Suelos.....	238
4.4.1.	Mecánica de Fractura Lineal Elástica.....	238
4.4.1.1.	Inicio de Agrietamiento y Propagación de la Grieta usando la MFLE.....	240
4.4.2.	Mecánica de Fractura Computacional (MFC).....	241
4.4.2.1.	Visión Global del Modelo Propuesto.....	243
4.4.2.2.	Remallado Automático.....	246
4.4.2.3.	Trayectoria de la Fisura.....	247
4.4.2.4.	Otras Técnicas para Simular la Propagación de Grietas.....	248
	Capítulo 5 Simulaciones Numéricas.....	249
5.1.	Presentación del Código Propuesto para el Análisis de la Desección en Suelos Arcillosos.....	251
5.1.1.	Desección con Restricciones Mínimas.....	251
5.2.	Efecto de las Condiciones de Contorno en Desplazamientos y Succión en la Retracción por Secado.....	260
5.2.1.	Esquema CC01-PC01.....	262
5.2.2.	Esquema CC01-PC02.....	264
5.2.3.	Esquema CC02-PC01.....	267
5.2.4.	Esquema CC03-PC01.....	269
5.2.5.	Esquema CC11-PC01.....	270
5.2.6.	Esquema CC11-PC06.....	273
5.2.7.	Esquema CC15-PC01.....	273
5.2.8.	Esquema CC09-PC02.....	275
5.2.9.	Esquema CC08-PC04.....	279
5.2.10.	Conclusiones sobre la influencia de las Condiciones de Contorno en una Sección Radial de Muestras Cilíndricas.....	279
5.3.	Efecto de la Grietas en el Proceso de Desección.....	281
5.3.1.	Influencia de una Grieta Central en la Desección.....	282
5.3.2.	Efecto de las Grietas Laterales en el Contacto con la Bandeja.....	286
5.3.3.	Conclusiones sobre el Efecto de las Grietas en la Desección de Suelos Arcillosos.....	294
5.4.	Estudio de Ensayos de Desección de Suelos Arcillosos en Laboratorio.....	295
5.4.1.	Arqueo en Muestras de Pequeño Espesor.....	295

5.4.1.1.	Experimento de Laboratorio con Muestras Delgadas.....	296
5.4.1.2.	Explicación Teórica de Kodikara.....	296
5.4.1.3.	Simulación Numérica del Arqueo usando FLAC.....	300
5.4.1.4.	Propiedades del Suelo usado para Estudiar el Arqueo.....	300
5.4.1.5.	Enfoque del Modelo de Kodikara.....	301
5.4.1.6.	Simulación Numérica con Código programado en MATLAB.....	301
5.4.1.7.	Enfoque del Modelo de esta Tesis.....	303
5.4.1.8.	Etapas de Contracción Isótropa.....	304
5.4.1.9.	Etapas de Contracción con Arqueo Cóncavo.....	306
5.4.1.10.	Etapas de Contracción con Arqueo Convexo.....	306
5.4.1.11.	Comparación de los Resultados Experimentales con las Simulaciones con el Código FLAC y con el Código MATLAB de esta Tesis.....	309
5.4.1.12.	Discusión de los Resultados del Fenómeno de Arqueo en Muestras de Pequeño Espesor.....	310
5.4.2.	Análisis de la Desección de Muestras de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura (Lakshmikantha, 2009).....	312
5.4.2.1.	Ensayo con una Muestra de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Ambiente de Laboratorio (Lakshmikantha, 2009).....	312
5.4.2.2.	Ensayo con una Muestra de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009).....	314
5.4.2.3.	Ensayo con una Muestra de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada Rápidamente en Cámara Ambiental.....	318
5.4.2.4.	Comparación de los Resultados de Ensayos sobre Muestras Cilíndricas de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura.....	318
5.4.2.5.	Simulación de Ensayo de Secado Rápido en una Muestra de 40 cm de diámetro x 10 cm de altura.....	320
5.4.2.6.	Enfoque del Modelo Numérico de esta Tesis.....	321
5.4.2.6.1.	Etapas 1: Análisis de Desección con el Esquema CC14-PCA.....	325
5.4.2.6.2.	Etapas 2: Análisis de Desección con el Esquema CC02b-PCA.....	328
5.4.2.6.3.	Etapas 3: Análisis de Desección con el Esquema CC18-PCB.....	334
5.4.2.6.4.	Etapas 4: Análisis de Desección con el Esquema CC18-PCC.....	337
5.4.2.6.5.	Etapas 5: Análisis de Desección con el Esquema CC18-PCD.....	339
5.4.2.6.6.	Etapas 6: Análisis de Desección con el Esquema CC18-PCE.....	341
5.4.2.7.	Discusión de Resultados del Análisis de Desección de Muestras de 40 cm de diámetro x 10 cm de Altura.....	344
5.4.3.	Análisis de la Desección de Muestras de 80 cm de diámetro x 10 cm de altura.....	347
5.4.3.1.	Ensayo con una Muestra de 80 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009).....	347
5.4.3.2.	Ensayo con una Muestra de 80 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Liso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009).....	349
5.4.3.3.	Ensayo con una Muestra de 80 cm de diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Liso, Secada en Ambiente de Laboratorio.....	354
5.4.3.4.	Comparación de los Ensayos sobre Muestras Cilíndricas de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura.....	357
5.4.3.5.	Simulación de Ensayo de Secado en una Muestra de 80 cm de diámetro x 10 cm de altura.....	357
5.4.3.6.	Enfoque del Modelo Numérico de esta Tesis.....	358
5.4.3.6.1.	Análisis de Desección con Esquema CC02-PC01.....	359
5.4.3.6.2.	Análisis de Desección con Esquema CC03-PC01.....	361

5.4.3.6.3. Análisis de Dsecación con Esquema CC03-PC01 y Grieta Lateral Parcialmente Propagada.....	366
5.4.3.6.4. Análisis de Dsecación con Esquema CC09-PC02.....	369
5.4.3.7. Discusión de Resultados del Análisis de Dsecación de Muestras de 80 cm de diámetro x 10 cm de altura.....	372
5.4.4. Análisis de Dsecación de Muestras de Gran Tamaño.....	372
5.4.4.1. Ensayo sobre Muestra de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura Secada en Ambiente de Laboratorio (Lakshmikantha, 2009).....	373
5.4.4.2. Enfoque del Modelo Numérico de esta Tesis.....	376
5.4.4.3. Simulación de ensayo sin grieta sobre una Muestra Cilíndrica de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura.....	377
5.4.4.4. Simulación de ensayo con Agrietamiento sobre una Muestra Cilíndrica de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura.....	383
5.4.4.5. Discusión de Resultados de la Simulación de Muestra de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura.....	387
 Capítulo 6 Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.....	389
6.1. Conclusiones de la Vertiente Experimental.....	391
6.2. Conclusiones de la Vertiente Teórico-Numérica.....	395
6.3. Conclusiones Respecto de las Simulaciones Realizadas.....	396
6.4. Futuras Líneas de Investigación de la Vertiente Experimental.....	399
6.5. Futuras Líneas de Investigación de la Vertiente Teórica.....	401
6.6. Futuras Líneas de Investigación de la Vertiente Numérica.....	402
 Bibliografía.....	405
Referencias.....	407
Capítulo 1 Introducción.....	407
Capítulo 2 Estado del Arte.....	409
Capítulo 3 Análisis Experimental.....	416
Capítulo 4 Modelo Numérico.....	417
Capítulo 5 Simulaciones Numéricas.....	420

Anexos

Anexo A – Ecuación Constitutiva Mecánica en 2D	I
1. Relación Tensión Deformación para Suelos no Saturados en Deformación Plana.....	I
2. Análisis de la Influencia del Módulo de Poisson en los Coeficientes de la Relación Tensión-Deformación para suelos no saturados.....	II
3. Influencia de los Parámetros de la Superficie de Estado en las Propiedades Mecánicas del Suelo.....	IV
4. Algunos de los Parámetros del Modelo Utilizados en las Simulaciones.....	VI
 Anexo B – Curva de Retención	 VII
1. Parámetros de la Curva de Retención.....	X
2. Influencia del parámetro λ o m	X
3. Influencia del parámetro η o b	X
 Anexo C – Georadar, Humidostato y Humidificador	 XI
1. Bases Técnicas de los Sistemas de Georadar.....	XI
1.1. Principios Fundamentales.....	XII
1.2. Especificaciones Técnicas del Equipo.....	XV
2. Humidostato de Control Electrónico.....	XVI
3. Humidificador.....	XVII
 Anexo D – Publicaciones	 XIX
1. Artículos de Revista Internacional (en preparación).....	XIX
2. Artículos de Congreso.....	XIX
3. Tesis de Master en Métodos Numéricos (CIMNE, UPC, Barcelona).....	XX
4. Tesina de Final de Carrera de Ingeniería de Caminos (ETSECCPB, UPC).....	XX
5. Participación en Proyectos Competitivos en España.....	XXI
6. Actividad Profesional Actual (Universidad de Swansea, Reino Unido).....	XXI
 Anexo E – Apéndice Digital	 XXIII
1. Resultados de los ensayos de laboratorio.....	XXIII
2. Simulaciones numéricas.....	XXIII
3. Código hidromecánico que resuelve el problema de desecación.....	XXIV

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad".

Albert Einstein (1879-1955)

Capítulo 1

Introducción

La rotura y la formación de grietas en suelos por causas de tipo mecánico, como por ejemplo las superficies de deslizamiento en taludes (Vallejo, 1994) o las grietas originadas por la subsidencia en minería o en excavación de túneles, han sido temas relativamente bien estudiados en Geotecnia y en Ingeniería del Terreno. Sin embargo, las grietas producidas por cambios de humedad del suelo, por ejemplo a causa de la acción de las raíces de los árboles (evapotranspiración) o por evaporación, o bien debido a cambios en las condiciones climáticas, han sido en general poco estudiadas desde un punto de vista hidromecánico, a pesar de ser frecuentes en climas de tipo mediterráneo. De hecho la capacidad de retención de agua de los suelos arcillosos ha sido estudiada desde principios del siglo XX especialmente por investigadores del campo de la Agronomía. En Geotecnia, Casagrande (1948) sistematizó dichos estudios previos que son de uso habitual en Mecánica del Suelo y en Edafología¹.

Las grietas producidas por desecación en suelos se producen debido a la retracción de la arcilla cuando disminuye su humedad y principalmente debido a restricciones en dichas deformaciones.

Aunque el fenómeno es bien conocido desde antiguo, su predicción y análisis se ha realizado siempre desde una perspectiva bastante empírica y poco justificada desde un punto de vista geomecánico. Algunos trabajos intentaron avanzar en la predicción de la formación de fisuras desde un punto de vista cientí-

¹ La Edafología es una rama de la ciencia que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea. Dentro de la edafología aparecen varias ramas teóricas y aplicadas que se relacionan en especial con la física, la química y la biología.

fico, como por ejemplo Corte & Higashi (1960), Juárez Badillo & Rico Rodríguez (1969), Lau (1987) y los trabajos más recientes de Morris, et al. (1992), Abu-Hejleh & Znidarcic (1995) y Konrad & Ayad (1997b). No obstante, todavía no hay una herramienta bien establecida y aceptada para llevar a cabo dicha predicción.

La desecación en suelos arcillosos o limo-arcillosos, desde el punto de vista geotécnico, es el proceso de pérdida de humedad debido a que ciertas condiciones impuestas por el ambiente (temperatura, humedad, posición del nivel freático, radiación solar y vientos) propician la evaporación del agua contenida en la masa de suelo. Dicho proceso desencadena ciertos mecanismos que producen a su vez retracción y en muchos casos agrietamiento.

El proceso de desecación en suelos se presenta frecuentemente en el campo y se estudia exhaustivamente en el laboratorio desde hace casi un siglo (Kindle, 1917; Haines, 1923; Longwell, 1928).

En una primera etapa del desarrollo de esta Tesis, el autor ha trabajado principalmente en los aspectos teóricos y numéricos del problema aunque en paralelo con la vertiente experimental. En esta última fase se ha ampliado el trabajo experimental realizado previamente por Ávila (2004) y Lakshmikantha (2009), en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, avanzando en los efectos de las variables medioambientales sobre el proceso de desecación y humedecimiento de la arcilla roja de Barcelona.

Esta Tesis Doctoral presenta un estudio teórico, experimental y numérico del problema de la desecación en suelos arcillosos, que incluye una exploración experimental del problema de la humidificación y la inundación para cerrar el ciclo natural de humedecimiento y secado al cual están sometidos este tipo de materiales en la naturaleza. Se trata de un problema de gran complejidad teórica, experimental y numérica y por ese motivo el enfoque ha sido desde las tres vertientes, con una investigación de tipo fundamental ya que intenta explicar la física del problema en el desarrollo de la desecación, la retracción y el agrietamiento del terreno. Esta temática es de gran interés en la comunidad científica y tiene gran cantidad de aplicaciones prácticas como se verá a continuación.

En este primer capítulo se presenta el problema tal y como aparece en el campo y en el laboratorio, describiendo en este último caso la técnica utilizada para el estudio del fenómeno. Se establece el objetivo de la tesis en la vertiente experimental y teórico-numérica. Se resumen a continuación los campos de aplicación de la investigación realizada. Seguidamente, se definen cuáles son los aspectos fundamentales del problema estudiado así como el alcance de la tesis. Finalmente, se presenta la metodología y las hipótesis de trabajo.

1.1. El Fenómeno de Dsecación en Suelos

Se presenta en este apartado el fenómeno de desecación tal y como se observa en la naturaleza sin intervención del hombre. Este proceso consiste en la retracción y consiguiente agrietamiento de los suelos cuando se produce desecación, es decir, pérdida de humedad.

A pesar de que el problema presenta características generales, existe una gran variabilidad cuando se analizan distintos casos de desecación. En cuanto al patrón de agrietamiento, cuando se produce, tiende en general a ser poligonal. En general, los patrones rectangulares y pentagonales son los más abundantes (Figura 1.1-1.4), aunque a veces se presentan patrones de grieta hexagonal (Figura 1.5-1.6). El grosor y profundidad de las grietas es también muy variable, desde apenas perceptible a simple vista hasta grietas de enormes dimensiones. El fenómeno de arqueado (*curling*), levantamiento de los extremos de las porciones de suelo en desecación, a veces parece inexistente y a veces llega a extremos muy llamativos (Figura 1.3).

En la Figura 1.3 se observan 6 casos de suelos agrietados. El primer caso, en la Figura 1.3a, corresponde a un suelo que presenta vegetación y, por lo tanto, está probablemente sometido a evapotranspiración. Presenta unas grietas de grosor importante pero poca profundidad y un efecto de arqueado, visible a simple vista, con porciones de suelo que tienden a levantar sus extremos. La Figura 1.3b muestra grietas de mayor profundidad y no se observa arqueado. Se observa además una marcada diferencia entre grietas primarias (*más gruesas*), que se habrán producido en primera instancia, y grietas secundarias (*más finas*) que se producen posteriormente a las primarias. En el caso de la Figura 1.3c se ven grietas de menos grosor que las anteriores y poca profundidad. El arqueado es leve pero evidente. También se distinguen grietas primarias y secundarias. La Figura 1.3d muestra un suelo desecado donde cada porción se arquea considerablemente. Algunas porciones presentan grietas secundarias y otras no. En el caso de la Figura 1.3e se muestran porciones de suelo alargadas que han quedado definidas por un agrietamiento primario. Posteriormente se subdividen mediante grietas secundarias y tal vez terciarias además de sufrir un arqueado muy pronunciado. Finalmente, la Figura 1.3f muestra una delgada capa de suelo que presenta un arqueado extremo.

En la Figura 1.4 se muestran nuevamente una serie de ejemplos de suelos desecados. La Figura 1.4a presenta una delgada capa de suelo sobre un substrato diferente. Se observan al menos tres sistemas de grietas bien definidas. La Figura 1.4b presenta la desecación y agrietamiento de un residuo minero. En este caso se observa una gran cantidad de retracción debido a la desecación. Las figuras restantes muestran a la izquierda fotografías de suelos desecados y a la derecha simulaciones hechas para películas animadas. La industria del cine demanda simulaciones de

cambio de texturas para simular distintos tipos de ambientes virtuales entre los que se incluyen suelos agrietándose (Iben & O'Brien, 2006; Federl, 2002; Aoki, et al., 2002). A pesar de ser modelos físicos, estas simulaciones no explican los mecanismos que producen la desecación, retracción y agrietamiento sino que se centran en reproducir el aspecto que tienen las grietas. En nuestro caso se busca, más que reproducir el aspecto de las grietas, poder comprender los mecanismos fundamentales, desde un punto de vista geotécnico, que gobiernan su aparición y propagación.

La desecación, la retracción y el agrietamiento no son un fenómeno estático sino que se desarrollan a lo largo del tiempo. Las grietas se originan generalmente en un suelo saturado con aspecto sano, el cual se retrae debido a la desecación para finalmente agrietarse. Todos estos estados pueden observarse en la Figura 1.1. Desde arriba hacia abajo se ve el suelo en estado saturado (*sano: sin grietas*), parcialmente saturado (*con grietas en evolución*) y seco (*agrietado*).

Con todos estos ejemplos queda claro que el comportamiento en desecación y posterior retracción y agrietamiento es complejo. Nos enfrentamos a diversos retos a la hora de comprender exactamente lo que está ocurriendo. Para conseguirlo se suelen realizar ensayos con distinto grado de control tanto en el campo como en el laboratorio. El estudio en laboratorio nos permite tener control sobre las variables medioambientales fundamentales (*temperatura y humedad relativa del ambiente*) y esto es una ventaja. Sin embargo, en el laboratorio introducimos otras variables que pueden alterar el estudio, tales como las condiciones de contorno impuestas por los propios contenedores en los que se ejecutan los ensayos.

1.1.1. Desecación en el Campo

El proceso de desecación, comienza con un suelo que presenta gran contenido de humedad. El suelo es un sistema termodinámico abierto en contacto con el medio ambiente que impone ciertas condiciones que lo harán evolucionar hasta alcanzar un estado de equilibrio cuyo aspecto final es por ejemplo el mostrado en la Figura 1.5.

La acción del medio ambiente sobre el suelo es cíclica, siguiendo la alternancia de épocas cálidas y secas, que inducen la evaporación del agua contenida en la masa de suelo y por lo tanto su retracción, con épocas lluviosas, en las que se aporta agua al suelo y se favorece su hinchamiento. Por otro lado, el medio ambiente no es el único factor en la eliminación de agua del sistema, la presencia de vegetación, por ejemplo, también contribuye a disminuir el contenido de humedad a través de procesos de transpiración (*extracción de humedad mediante las raíces*).

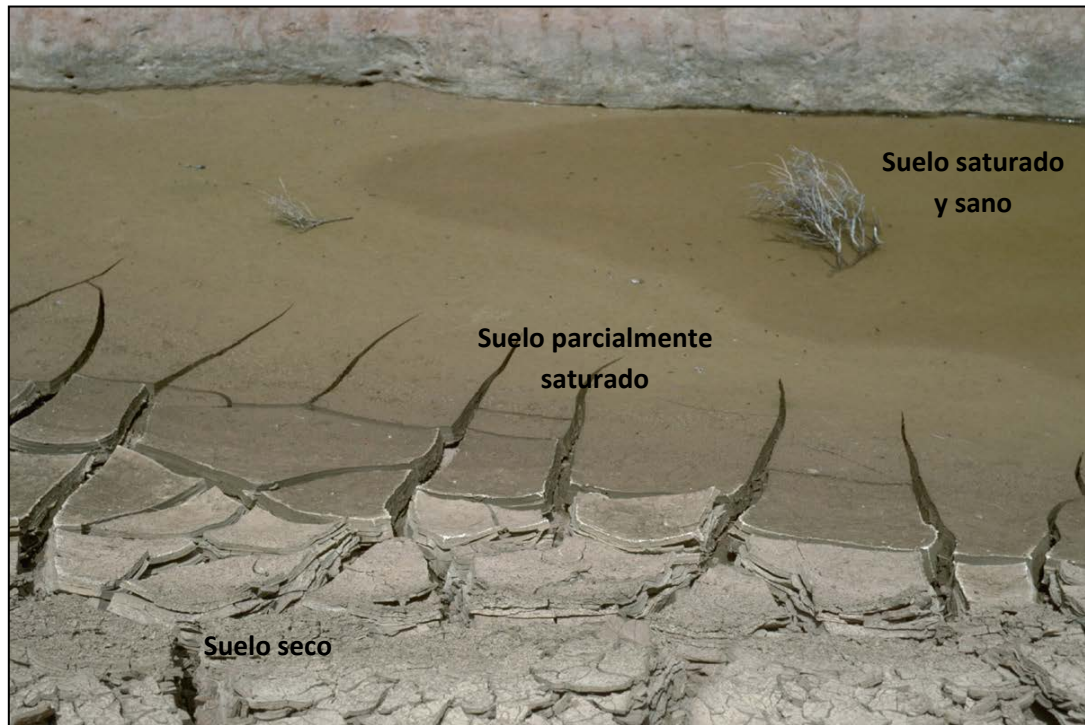


Figura 1.1 - Suelo que presenta tres estados



Figura 1.2 - Agrietamiento por desecación en suelos arcillosos. *Río Grande, Méjico.*



(a) Evapotranspiración, *Karkheh, Irán.*



(b) Sin arqueo, Grietas en la confluencia de los ríos Mamore y Grande. *Bolivia.*



(c) Arqueo leve.



(d) Arqueo pronunciado, *Utah, USA.*



(e) Arqueo muy pronunciado, *Desierto de California.*



(f) Arqueo extremo, *USA.*

Figura 1.3 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación 1



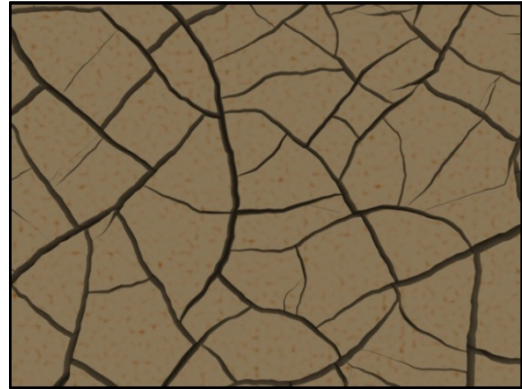
(a) Grietas en mezquita del *Valle de la Muerte*. Grietas primarias, secundarias y terciarias.



(b) Grietas en Lodo de Depuradora de *Kos, Grecia*.



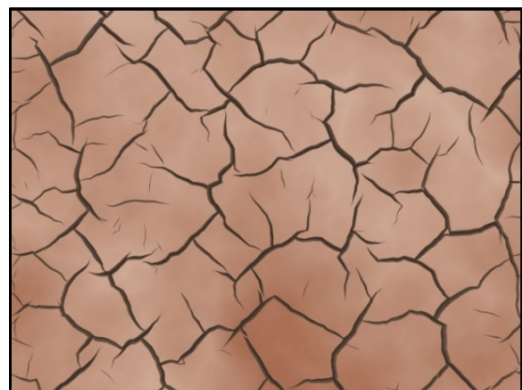
(c) Foto



(d) Animación



(e) Foto



(f) Animación

Figura 1.4 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación 2.
Las animaciones (d) y (f) fueron hechas con modelos físicos para reproducir agrietamiento en lodo.
Forman parte de la investigación en el campo de la animación en cine (Iben & O'brien, 2006).



Figura 1.5 - Patrones hexagonales en sedimentos uniformes, *Nevada*. (Lau, 1987)

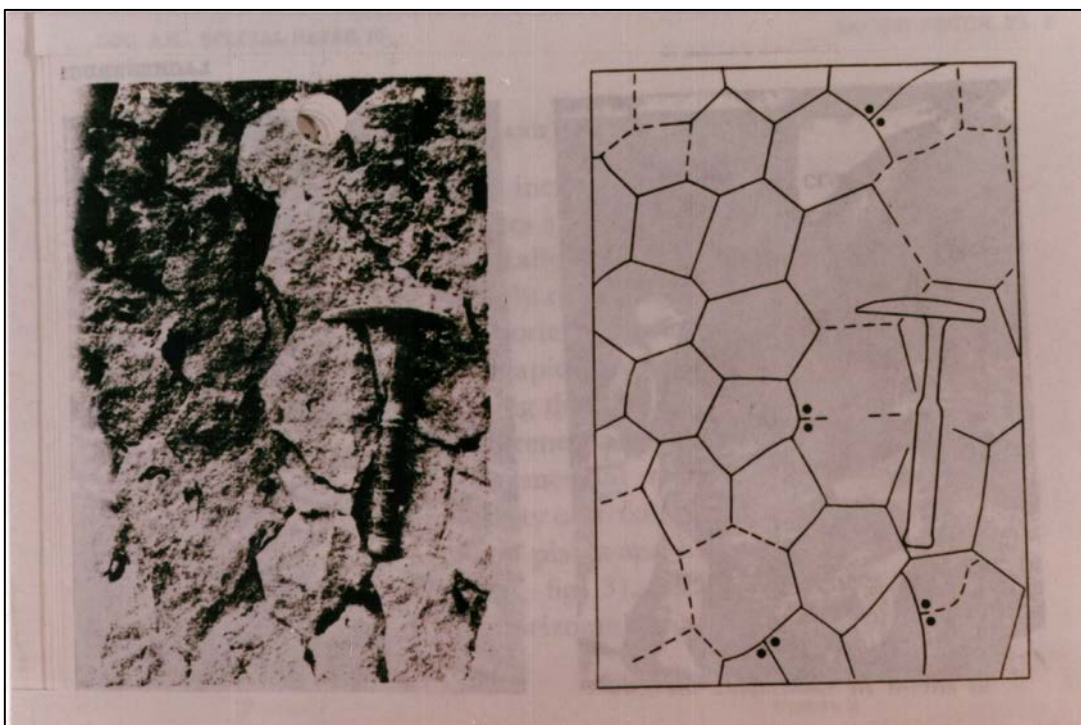


Figura 1.6 - Patrones hexagonales *Mt. Rainer National Park, Washington*. (Lau, 1987)

El fenómeno combinado se denomina evapotranspiración y constituye un importante componente del ciclo y balance del agua.

En el caso de lechos de lagos, se puede producir la total inundación del mismo en períodos de fuertes lluvias. Estas precipitaciones pueden llegar a contrarrestar los procesos de desecación e incluso invertirlos por completo humedeciendo las arcillas hasta saturarlas y cerrando algunas o todas las grietas que se habían formado.

Por otra parte, si el agua presenta sales disueltas (*cloruros, sulfatos, etc.*) pueden desarrollarse también procesos químicos que produzcan pérdida de agua o incremento en las tensiones capilares (*succión*) que inducen retracción y consiguiente agrietamiento (Skempton & Northey, 1952). La extracción de agua para el consumo también puede provocar grietas por retracción en los suelos arcillosos.

Es evidente, por lo tanto, que el proceso completo que se observa en la naturaleza es muy complejo y muy difícil de abordar. Afortunadamente, para las aplicaciones en el campo de la geotécnica, es posible prescindir de varios factores que aparecen en el proceso de desecación. Así, la transpiración de las plantas en general no se tendrá en cuenta, lo cual simplifica en parte el tratamiento. Por otro lado, en el contexto de esta tesis, en lo referente a la simulación del problema, solo se tendrá en cuenta el proceso de desecación (*un solo semi-ciclo*). También y debido a que este proceso puede darse en condiciones isotermas se estudiará solo el problema hidromecánico y se descarta todo lo relacionado con los procesos químicos. Tampoco tendremos en cuenta en esta tesis los procesos de extracción de agua con fines de explotación. Así pues, nos centramos en los procesos de desecación causados por la variación en las variables medioambientales y más concretamente las variaciones de humedad relativa del ambiente. Respecto de la temperatura, diremos que será una variable controlada y mantenida en general constante durante los procesos. Se presenta, sin embargo, un estudio de humedecimiento y secado además de inundación en la vertiente experimental.

1.1.2. Desecación en el Laboratorio

Cuando se estudia el fenómeno en el laboratorio, las condiciones en las que se produce el secado son controladas. En la Figura 1.7 se ilustra un ejemplo de ensayo de secado en cámara ambiental, realizado para esta Tesis Doctoral.

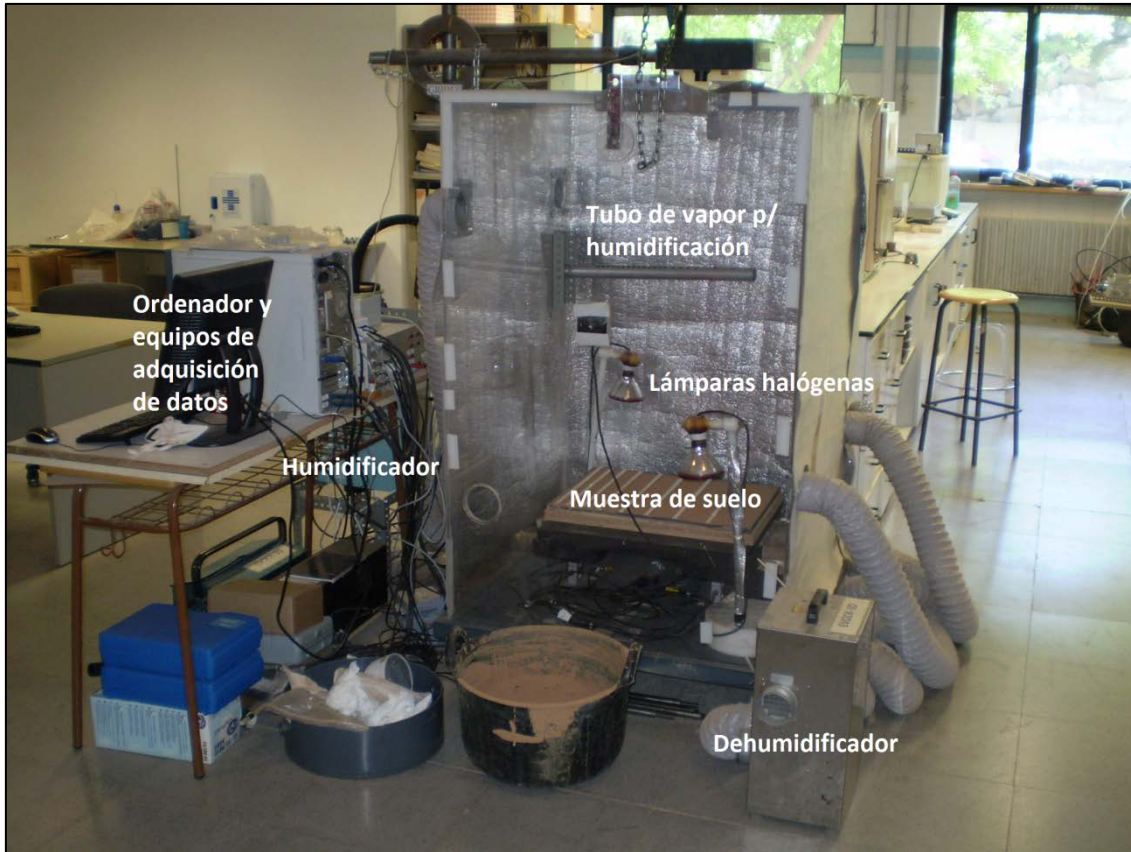


Figura 1.7 - Cámara Ambiental en el laboratorio del Departamento de Ingeniería del Terreno, UPC.

En este caso se mantienen constantes la temperatura y la humedad del ambiente de la cámara, con lo cual la desecación se produce exclusivamente debido a que la muestra de suelo evoluciona hasta alcanzar las condiciones de humedad que impone el ambiente controlado.

Las Figura 1.8a y b muestran imágenes de ensayos hechos en el laboratorio con muestras circulares de $80\text{ cm de diámetro} \times 10\text{ cm de altura}$, que presentan agrietamiento generalizado en un caso y una grieta central en el otro. En la Figura 1.8c, se presenta el resultado de un ensayo sobre muestra rectangular de $59.4\text{ cm de largo} \times 42\text{ cm de ancho} \times 2\text{ cm de altura}$ en proceso de agrietamiento. En la Figura 1.8d se presenta un ensayo en bandeja circular de $40\text{ cm de diámetro} \times 10\text{ cm}$ sometida a un proceso de secado rápido. En la Figura 1.9 se presenta una bandeja rectangular con una superficie de 0.25 m^2 y un espesor de tan solo 1 cm , subdividida con varillas de PVC. En la Figura 1.10 se observa el efecto de arqueo que suele ser característico en algunos tipos de suelo sometidos a desecación (Lakshmikantha, 2009). El caso particular de la arcilla de Barcelona que se presenta en dicha figura no presenta un arqueo extremo, pero si lo suficientemente acusado como para apreciarlo a simple vista.

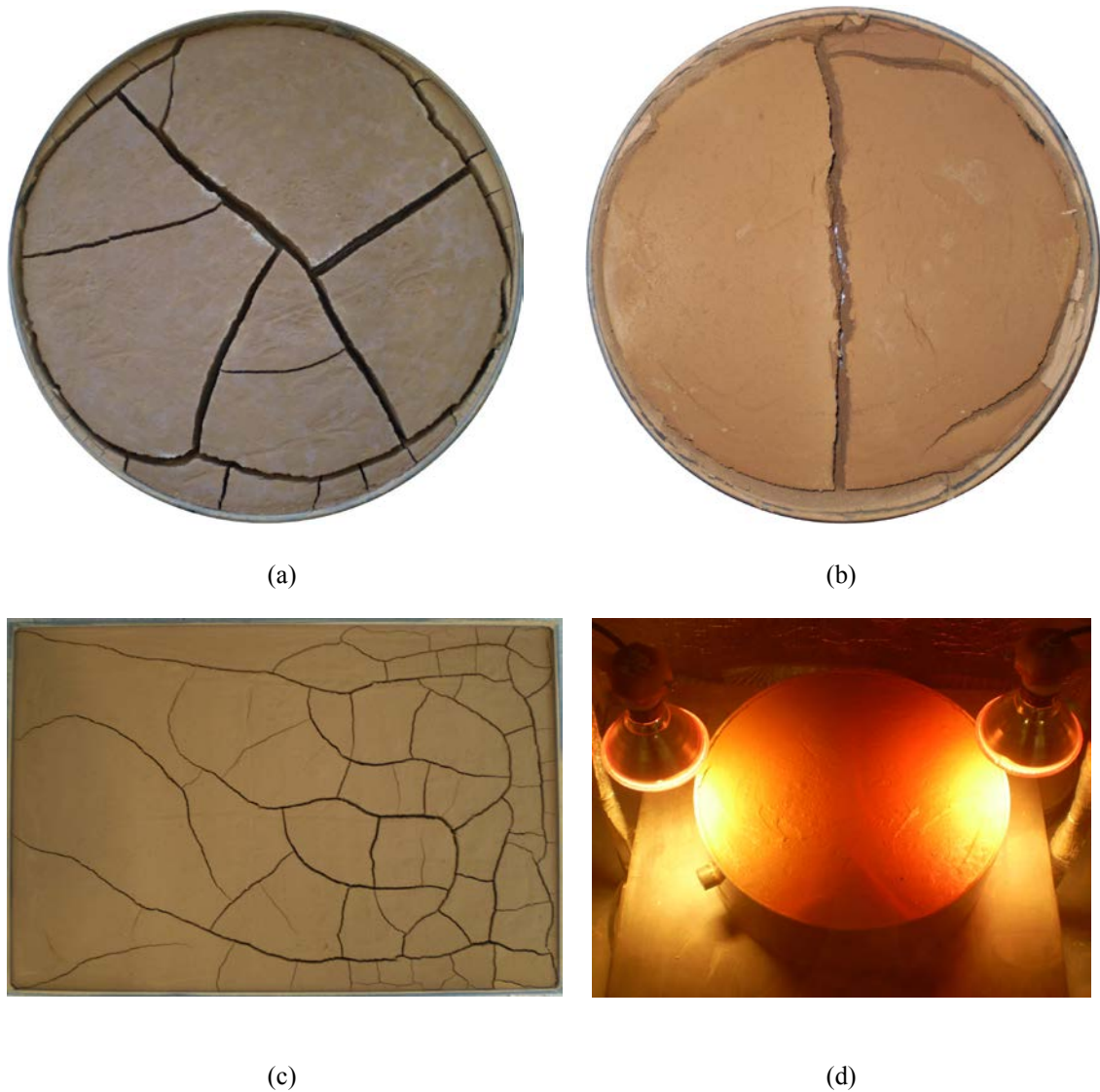


Figura 1.8 - Ejemplos de suelos sometidos a desecación en bandejas circulares y rectangulares en el laboratorio: a) *Espécimen de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura*; b) *Espécimen de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura*; c) *Espécimen de 59.4 cm largo \times 42 cm ancho \times 2 cm de altura*; d) *Espécimen de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura*

1.1.2.1. Preparación del suelo

El suelo utilizado en los ensayos es la arcilla roja de Barcelona que se encuentra en el recinto del Campus Nord de la UPC. El primer trabajo a realizar es la trituración y tamizado del suelo hasta obtener un polvo relativamente fino (*tamaño máximo 2 mm*). Con este proceso se intenta eliminar toda partícula gruesa que pueda interferir y/o producir agrietamientos por concentración de tensiones o irregularidades en la masa de suelo en desecación.



Figura 1.9 - Patrón final de grietas en bandeja de suelo A2-10. (Dimensiones: 59.4 cm x 42 cm; superficie: 0.25 m²; espesor de la muestra: 1 cm; bandeja con subdivisiones de PVC).

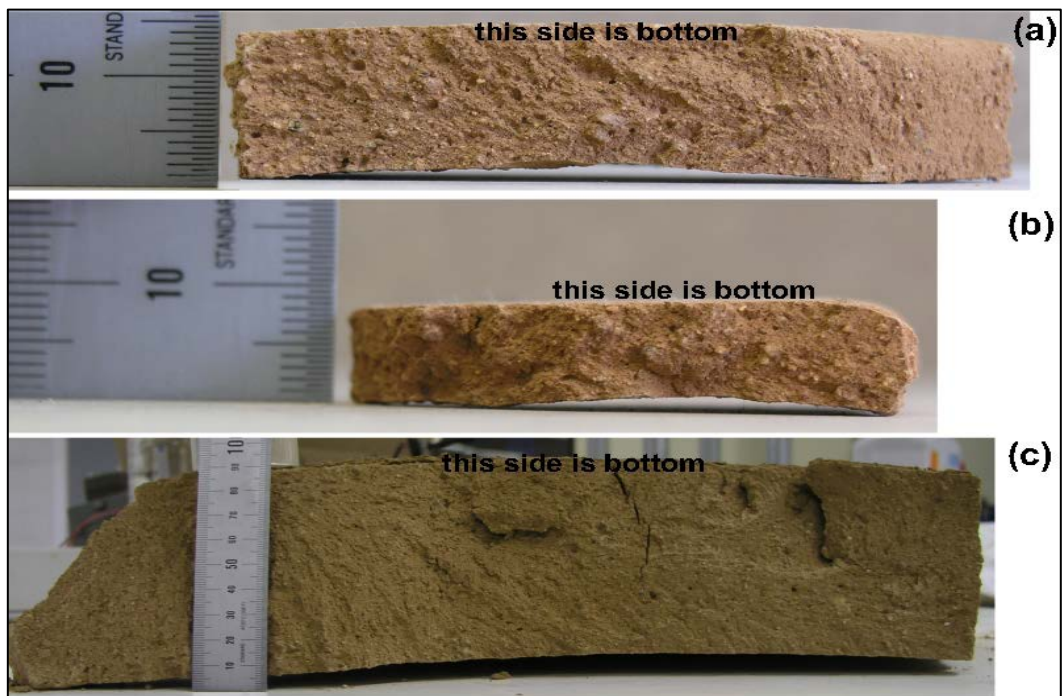


Figura 1.10 - Arqueo obtenido en muestras de arcilla de Barcelona desecadas en el laboratorio (Lakshmikantha, 2009)

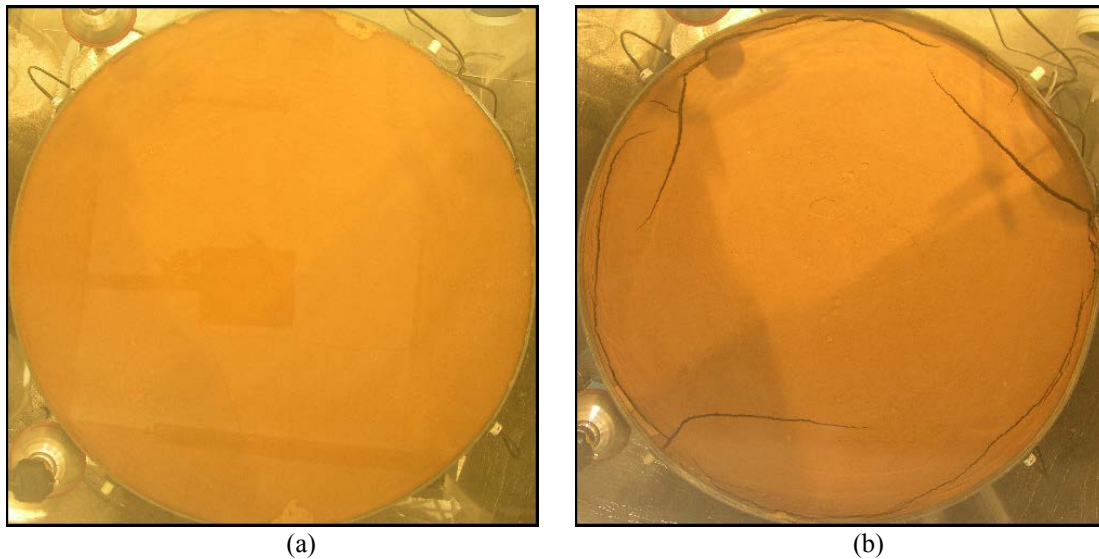


Figura 1.11 – Ensayo cíclico: Secado, humedecimiento, inundación, secado y humedecimiento.
a) Agua en la superficie durante las primeras horas de ensayo de desecación; b) Grietas en contacto con la bandeja y grietas en la masa de suelo.

Una vez que se tiene el polvo de arcilla finamente molido se procede a la mezcla con agua y su amasado hasta obtener un lodo blando y lo más homogéneo posible, evitando la presencia de grumos que puedan ser fuentes de grietas. A pesar de los cuidados y de utilizar las manos para amasar la mezcla de suelo y agua pueden quedar pequeños grumos cuya influencia en los resultados es imposible de predecir y/o cuantificar.

En el proceso de triturado se rompen parte de las partículas de suelo natural y durante el proceso de amasado con agua introducimos energía mecánica al sistema que hace que el suelo en un primer momento tenga una capacidad de retención de agua mayor que en situación de reposo. Esto queda en evidencia cuando una vez volcado el lodo semifluido en la bandeja de desecación, el agua, en las primeras horas, asciende a la superficie quedando una delgada capa de líquido visible en las fotos del ensayo en la Figura 1.11a.

1.1.2.2. Particularidades en el Laboratorio

El mecanismo de agrietamiento por desecación consiste en varios procesos que se desarrollan de manera simultánea. En primer lugar, al iniciarse el ensayo con la imposición de unas condiciones ambientales que propicien la desecación, se produce la evaporación del agua en exceso que posee la muestra. Esta evaporación continúa hasta el último día de ensayo con algunas diferen-

cias a lo largo del proceso. En una primera etapa, la muestra prácticamente no se deforma y permanece saturada. En una segunda etapa se produce retracción (*disminución de volumen*) pero el suelo permanece saturado, es decir, todo el volumen de agua perdido se corresponde exactamente con la disminución del volumen de poros. En una tercera etapa la retracción viene acompañada de una desaturación de los poros del suelo.

En todo momento el suelo está contenido en una bandeja que también interactúa con la masa de suelo. En los contactos entre el suelo y la bandeja se desarrollan fuerzas de adherencia que impiden en los instantes iniciales de la retracción que la muestra reduzca su volumen. Cuando la adherencia es vencida por las fuerzas debidas a la succión, la masa de suelo se desprende de los bordes generando casi siempre una característica configuración de agrietamiento a lo largo del contacto entre el suelo y la bandeja (Figura 1.8b y d). Las fuerzas de adherencia pueden ser lo suficientemente grandes como para que esta grieta perimetral se produzca en la masa de suelo y no en el contacto preciso entre bandeja y suelo (Figura 1.8a y b).

El proceso de desecación continúa con el agrietamiento visible en superficie y en su caso con agrietamiento en el interior de la muestra o por debajo de ella, hasta que se decide detener el ensayo o bien iniciar un proceso de humedecimiento.

En el interior de la masa de suelo ocurren también procesos complejos. Mientras la muestra está saturada, los poros sólo contienen agua en estado líquido. A partir de la desaturación en los poros hay aire y agua. El aire es una mezcla de aire seco y aire con vapor de agua puesto que en la fase gaseosa se producen cambios de estado. Es evidente por lo tanto, que el fenómeno del agrietamiento de suelos por desecación, es un problema acoplado hidro-mecánico (*o termo-hidro-mecánico-químico, si se tuvieran en cuenta las componentes térmica y química*).

1.2. Objetivos de la Tesis

La fisuración de la capa superior del terreno en suelos cohesivos es un fenómeno bastante corriente cuando se producen cambios de humedad debidos a cambios en las condiciones del medio ambiente (*temperatura, humedad relativa*). El fenómeno se manifiesta con la formación de una costra rígida en la superficie y la formación de fisuras que penetran en la masa de suelo. Estas fisuras superficiales aumentan considerablemente la permeabilidad debido a que las grietas representan caminos preferenciales para el flujo de agua. Esto es un problema grave en muchos casos como balsas de residuos mineros o capas de protección o cierre en zonas de vertedero o almacenaje de residuos, donde el transporte de contaminantes puede aumentar considera-

blemente. En la actualidad se aprecia un interés creciente en la literatura por estos temas, partiendo de campos a veces no relacionados entre sí, como la industria minera, el almacenaje de residuos, o la agricultura. El objetivo fundamental de esta Tesis Doctoral es estudiar cuales son las variables que influyen en la retracción y el agrietamiento de suelos arcillosos o limo-arcillosos sometidos a procesos de desecación.

1.2.1. Vertiente Experimental

Se plantea el estudio del proceso de fisuración como un fenómeno tridimensional, investigando aspectos clave como el impacto de la apertura de fisuras en el volumen de agua evaporada, la causa de la diferencia en la morfología de fisuras observada en las superficies exterior e interior de las muestras o la morfología de la red tridimensional de fisuras.

Para ello se procede a la introducción de modificaciones en equipos existentes y equipos adicionales para la detección y visualización de la red de fisuras tridimensional que se genera en la matriz del suelo (*sistemas de adquisición de datos, georadar con antena de alta frecuencia, adquisición automática de imágenes, etc.*).

Los objetivos experimentales generales que se plantean en esta investigación son los siguientes:

- Lograr una mayor comprensión de los mecanismos de formación y propagación de grietas de desecación en suelos.
- Estudiar alternativas para la auscultación tridimensional de muestras en proceso de desecación y agrietamiento.
- Realizar ensayos en muestras rectangulares delgadas para estudiar la formación de fisuras por desecación en suelos y su relación con el tamaño máximo de partículas del suelo.
- Avanzar en el análisis de la relación existente entre la relación de dimensiones de los lados de las bandejas de suelo sometidas a secado y el patrón de grietas resultante.
- Mejorar el equipamiento existente para permitir un mejor control de los ciclos de humedad-temperatura, incluyendo además del secado, la posibilidad de humedecimiento controlado.
- Avanzar en el estado de conocimiento del fenómeno de desecación, añadiendo ciclos de humedecimiento e inundación.

Para ello se procede a la ejecución de ensayos de laboratorio para reproducir las condiciones ambientales (*temperatura, humedad y sus ciclos*) que se dan en el medio natural, controlando todas las variables físicas que intervienen y midiendo la respuesta del suelo.

Más en detalle las tareas realizadas en el análisis experimental han sido las siguientes:

- Desarrollo de la metodología para el estudio de la red tridimensional de fisuras.
- Ejecución de ensayos y determinación de la estructura tridimensional de las fisuras mediante georadar.
- Planificación y adquisición de nuevos equipos.
- Modificación y ampliación de prestaciones de la cámara ambiental.
- Incorporación de los nuevos sistemas de control de temperatura y humedad.
- Ensayos de secado con probetas de varios tamaños. Comparación de resultados.
- Ensayos secado-humedecimiento-inundación-secado-humedecimiento y agrietamiento de la arcilla.
- Análisis de resultados y conclusiones.

1.2.2. Vertiente Teórico-Numérica

En la vertiente teórico-numérica, se ha trabajado previamente a esta tesis en nuestro centro en la adaptación de programas de cálculo existentes para que puedan simular el agrietamiento de suelos. Se han obtenido algunos resultados interesantes tanto con el código DRAC (Prat, et al., 2002) como con el programa Code_Bright (Olivella, et al., 1996), ambos basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF). Por un lado, DRAC es un programa de cálculo que permite simular juntas en un medio continuo y su apertura o cierre en función del estado tensional. Por otro lado, Code_Bright es un programa termo-hidro-mecánico para suelos no saturados, al que se le ha incorporado un modelo no tracción para poder estudiar el inicio del agrietamiento (Rodríguez, et al., 2007). A pesar de los logros obtenidos, se ha visto que es difícil adaptar los programas existentes para cubrir todo el proceso de agrietamiento, es decir, su iniciación y su propagación, incluyendo el efecto del agua en condiciones no saturadas. Por ese motivo, se

planteó el desarrollo de un nuevo programa que incorporase las características que interesan de cada uno de los códigos anteriores.

El objetivo final del trabajo teórico y numérico de la línea de investigación es la simulación de los ensayos que se lleven a cabo en la cámara ambiental, incluyendo las oscilaciones previstas como ciclos de secado y humedecimiento. De esta manera se espera poder entender los patrones de agrietamiento de los suelos en condiciones naturales.

En esta tesis los objetivos fundamentales son:

- Formular e implementar un modelo hidromecánico que permita la inclusión de un criterio de rotura para estudiar el problema de retracción y agrietamiento por secado de suelos arcillosos.
- Estudiar la distribución de succiones en una sección transversal, radial o diametral de una muestra.
- Comprobar que la aproximación hidromecánica propuesta es capaz de reproducir los principales mecanismos que gobiernan los procesos de retracción y agrietamiento en suelos sometidos a desecación.
- Comprender los mecanismos hidromecánicos que controlan dichos procesos.
- Dar una explicación geotécnica a algunos de los fenómenos particulares hallados durante los experimentos de laboratorio (arqueo, grieta en el contorno en contacto con la bandeja, etc.)
- Estudiar la influencia de los parámetros mecánicos e hidráulicos en el desarrollo de los procesos de desecación, retracción y agrietamiento.
- Estudiar la influencia de las condiciones de contorno durante el secado.
- Determinar la influencia de las grietas en el comportamiento general de la masa de suelo y su influencia en la respuesta mecánica e hidráulica.
- Reproducir ensayos de laboratorio calibrando los parámetros del modelo y analizar el grado de aproximación obtenido con el modelo.
- Desarrollar un método para la predicción de la formación y propagación de fisuras por desecación en suelos. Simular la apertura de fisuras en suelos por el MEF.

Más en detalle las tareas realizadas en el análisis teórico-numérico son:

- Desarrollar una formulación HM para simular la desecación, la retracción y la iniciación de fisuras en el suelo.
- Desarrollo de la formulación y la aplicación de una técnica para estudiar la formación y propagación de grietas utilizando conceptos de Resistencia de Materiales Clásica y Mecánica de Fractura (MF).
- Implementar un nuevo código de elementos finitos que incluya las formulaciones anteriores.
- Estudiar los efectos que tienen las distintas condiciones de los contornos en la respuesta del suelo al proceso de desecación.
- Implementar el remallado automático necesario (*separación de nodos*) tras la aparición de discontinuidades (*grietas*).
- Analizar casos simples de desecación de suelos.

La investigación se centra en la desecación producida por diferencias en el contenido de humedad entre el ambiente y la masa de suelo, y en la retracción y agrietamiento producidos por los cambios de succión en la matriz de suelo, que se traduce en tensiones de tracción capaces de alcanzar la resistencia a la tracción del material. También se estudia el fenómeno de arqueado en suelos, simulando el proceso observado en el laboratorio por otros investigadores como Kodikara, et al., (2004).

Se desprecian los efectos de la temperatura y se modela el fenómeno mediante dos grupos de ecuaciones. Por un lado el fenómeno hidráulico (*desecación*) y por otro el problema mecánico (*retracción y agrietamiento*). El problema hidromecánico resuelve el problema de la retracción del suelo debido a desecación. El problema de la iniciación y propagación de las grietas se resuelve utilizando conceptos de Resistencia de Materiales (RM) Clásica y elementos de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE).

1.3. Campos de Aplicación de la Tesis

El problema de grietas por desecación en suelos es muy importante en Geotecnia entre otras cosas porque tiene aplicación práctica y permitiría ahorrar costos y problemas en muchos con-

textos. En las últimas décadas, los fenómenos de formación de grietas en suelos debido a la pérdida de humedad han puesto de manifiesto algunos riesgos medioambientales importantes. En España, el clima favorece en general la desecación del terreno y la formación de fisuras distribuidas. Se presenta a continuación algunos ejemplos donde la desecación y agrietamiento juegan un papel central.

En **balsas mineras o de residuos industriales** el material se deposita normalmente con gran contenido de agua, pero los residuos pueden llegar a agrietarse debido a la retracción que se produce al perder agua por evaporación. Las grietas cambian la permeabilidad del residuo y sus propiedades mecánicas, lo que puede tener consecuencias diversas: alteración de las condiciones de estabilidad del material (*la no-saturación aumenta la resistencia del terreno, pero las grietas cambian el medio*), aumento de la permeabilidad y generación de caminos preferenciales de paso del agua (*que puede transportar contaminantes*), aumento de la erosionabilidad del material, etc. Los residuos mineros están formados generalmente por metales pesados que son altamente contaminantes, de ahí la importancia del control de las grietas (Rodríguez, 2002).

En **vertederos controlados** o en **instalaciones de almacenamiento de residuos**, (Rodríguez, et al., 2007), es habitual colocar una capa de arcilla compactada como barrera aislante, ya que se trata de un material natural de muy baja permeabilidad. En vertederos a cielo abierto dicha arcilla puede llegar a retraer por evaporación, agrietándose y generando caminos preferentes al paso del agua, con lo que el residuo que se coloque sobre ella puede generar lixiviados que podrían alcanzar con facilidad el medio natural. En el caso de residuos radiactivos, también se está estudiando la colocación de barreras fabricadas con arcilla expansiva (*bentonita*) que si se agrietan pierden su capacidad de retención de las fugas de los residuos. En este caso las grietas se producen por la acción del calor de la radiación. No hay que olvidar que la actividad de los residuos radiactivos puede durar muchos miles de años y durante todo ese tiempo el material debe trabajar en condiciones estables para la seguridad.

En zonas donde el agrietamiento es generalizado y distribuido, debido por ejemplo a una sequía importante, se pueden detectar daños incluso en las **edificaciones** y en la **obra pública** en general (Justo, et al., 2002). Si se llegan a producir grietas por desecación o por subsidencia el terreno pierde continuidad y disminuye su capacidad portante y resistente, lo que provoca patologías en las cimentaciones de los edificios y en las capas de apoyo de obras lineales (*por ejemplo carreteras y ferrocarriles*). También aumenta su erosionabilidad.

Muchas veces los suelos arcillosos se utilizan como aislante hidráulico en obras de ingeniería. Así por ejemplo una **presa de gravedad** (Tang, et al., 2008) hecha de material arcilloso se

agrieta por desecación cuando los niveles de agua de la presa bajan, luego el núcleo pierde su capacidad de retener el agua. En una presa, además, el suelo cumple una función resistente, dando estabilidad a la estructura, la cual se verá afectada también si aparecen grietas. Cabe aclarar que las presas que sufrirán los efectos de la desecación serán aquellas de pequeñas dimensiones y cuyo material de construcción es solo arcilla. Las grandes presas con núcleos arcillosos impermeables protegen a éste de la acción climática con otros materiales como la grava y arena, por lo que resulta poco probable, aunque no imposible, que se lleguen a estados que produzcan desecación. Las cimentaciones, taludes y caminos también pueden estar sometidos a los efectos de las grietas por desecación.

En **ingeniería agrícola**, las grietas pueden permitir el paso de agua con solutos a las tierras irrigadas (Bronswijk, 1991).

Así, es fundamental poder predecir con cierta exactitud cuándo y cómo se producirán y sobre todo progresarán estas grietas y hasta qué punto: qué profundidad alcanzarán y cómo estarán espaciadas. En la actualidad los mecanismos que gobiernan este fenómeno son esquivos y no se encuentran del todo establecidos. Un objetivo prioritario de la presente Tesis es contribuir al esclarecimiento del comportamiento de los suelos cohesivos bajo desecación, así como también proporcionar una herramienta de cálculo y análisis del problema. Las aplicaciones serán multidisciplinarias, ya que no sólo en la ingeniería geotécnica existe interés por los fenómenos de desecación, también en actividades de manufactura de productos tales como madera, cerámica, polímeros, etc. (Khalili, et al., 2014) y en la industria alimenticia (Pham & Willix, 1984) es un tema de actualidad e interés.

Los resultados de la investigación se podrán aplicar a contextos de fisuración de suelos por cambios de condiciones ambientales, estabilidad de taludes y laderas, barreras de contención (*presas de materiales sueltos, almacenaje de residuos urbanos, industriales o radioactivos, etc.*). Cuando los resultados del trabajo se hayan plasmado en una metodología aplicada de utilización práctica, los usuarios finales serían los científicos e ingenieros (*civiles, geólogos, ambientales, agrónomos*) que trabajan en campos afines al tema, los cuales dispondrán de un procedimiento definido y unas herramientas potentes para el diseño, re-evaluación y estudio de patologías, y la evaluación y reducción de situaciones de riesgo en situaciones reales.

A más largo plazo, se debería estar en condiciones de establecer recomendaciones para limitar el efecto de las oscilaciones medioambientales en el agrietamiento de suelos utilizados en instalaciones sensibles, como el caso de vertederos, balsas de riego o de residuos, plataformas de

apoyo de carreteras, etc. Las implicaciones prácticas de estos resultados son evidentes, ya que los fenómenos de degradación de suelos por agrietamiento son relativamente frecuentes.

1.4. Definición del Problema de Deseccación en Suelos

El problema central que se aborda en esta tesis es el estudio de la desecación en suelos arcillosos. Aunque a menudo se habla de grietas por desecación, conviene distinguir desde un principio qué se entiende por desecación en suelos y qué relación existe con el agrietamiento. En primer lugar, la desecación es el proceso por el cual el suelo pierde humedad. Esta pérdida puede producirse debido a factores climáticos: variaciones de temperatura, humedad, viento, etc. que producen evaporación del agua y en consecuencia desecación en el suelo. Por otro lado, el suelo pierde humedad también debido a procesos de evapotranspiración, que no es más que el consumo de agua de las plantas. Otro factor que puede extraer agua del suelo es la explotación de la misma para, por ejemplo, riego o consumo. Parece haber una relación directa entre grietas y subsidencia del terreno provocada por la explotación de acuíferos y un rebajamiento intensivo de los niveles piezométricos (Leonard, 1929; Schumann & Poland, 1969). Este trabajo se centra en la desecación producida por cambios medioambientales y, más precisamente, cambios en temperatura y humedad del ambiente al que está expuesto el suelo.

En suelos con gran contenido de arcilla, la desecación produce además de pérdida de humedad, retracción. Según sean las condiciones bajo las cuales se produce la retracción y las propiedades intrínsecas del suelo, ésta puede ser más o menos isótropa. En ocasiones, la retracción se produce sin fisuración aunque muchas veces la retracción viene acompañada por agrietamiento. En ciertas ocasiones, la desecación se asocia a un fenómeno de deformación anisótropo muy particular denominado arqueado donde delgadas capas de suelo se arquean elevando sus extremos de forma más o menos acusada.

En adelante, cuando se hable de “grietas por desecación”, se hará referencia a los fenómenos de desecación debido a la evaporación producida por cambios en los factores ambientales (*temperatura y humedad*) que vienen acompañados por retracción isótropa o anisótropa y que muchas veces presentan agrietamiento.

Una dificultad característica de los suelos es que se trata de un sistema multifase, y además algunas de estas fases se pueden presentar en varios estados de agregación de la materia, cambiantes a lo largo del tiempo. Si nos centramos específicamente en los suelos arcillosos, por ejemplo, debemos tener en cuenta que éstos pueden presentarse totalmente secos, saturados o par-

cialmente saturados y que además pasan de un estado a otro con relativa facilidad ante variaciones de las condiciones ambientales.

El fenómeno de la desecación involucra, como se ha visto, varios procesos. En el campo, partiendo de un suelo con alto contenido de humedad y en apariencia sano, sin grietas visibles, se produce retracción debido a la disminución de la humedad del suelo, que es la desecación, producida por ciertas condiciones impuestas por el ambiente. En función de las condiciones ambientales y del suelo existentes, una grieta puede aparecer y a continuación propagarse, o bien una grieta preexistente se puede reactivar y propagar. Con el tiempo, las condiciones del medio ambiente pueden aumentar nuevamente la humedad del suelo recuperando éste un estado parecido al inicial o bien quedando en un estado diferente presentando una apariencia no homogénea con varias grietas. Todo dependerá de cuánto cambien las condiciones meteorológicas (*lluvia, nieve, escorrentías, etc.*). Así, el suelo podrá estar sometido a un gran número de ciclos de humedecimiento y secado, retracción y expansión, agrietamiento y desaparición de grietas o bien reaparición de nuevas grietas entre grietas existentes.

En definitiva, el fenómeno de agrietamiento es parcialmente reversible puesto que el suelo puede recuperar la humedad perdida y de hecho en la naturaleza se producen ciclos de humedecimiento y desecación periódicos que pueden o no coincidir con cambios estacionales.

1.5. Alcance de la Tesis

Este trabajo se centra principalmente en el estudio de un semi-ciclo de secado. Es decir, se parte de un suelo en apariencia sano y saturado (*con alto contenido de humedad*) y se observa, estudia y simula el proceso de desecación y agrietamiento característico de los suelos con altos contenidos de arcilla.

El proceso de desecación y agrietamiento en suelos arcillosos es un fenómeno complejo con varios mecanismos involucrados. Existen flujos de vapor de agua en el medio poroso, cambios de estado del agua, retracción mecánica de la masa de suelo, fisuración del suelo, propagación de grietas. Estos mecanismos interactúan entre sí en el proceso de desecación, retracción y agrietamiento. Estamos por lo tanto ante un proceso físico que necesita para su estudio una aproximación multidisciplinar. La presente tesis aborda este problema desde los tres frentes posibles: teórico, experimental y numérico. Soluciones analíticas para este problema son impensables de momento debido a su gran complejidad.

Desde un punto de vista teórico, este problema se enmarca en la Mecánica de Medios Continuos (MMC). Particularmente desde un punto de vista geotécnico se utilizan conceptos de Mecánica de Suelos Saturados y no Saturados y para el tratamiento de las grietas la Resistencia de Materiales (RM) Clásica y conceptos de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE). Se estudian y analizan las teorías que se han ido desarrollando a lo largo de la investigación desde principios del siglo XX.

Desde la vertiente experimental se amplía un extenso programa que ya se ha desarrollado previamente en otras tesis y publicaciones del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC. Estos nuevos ensayos se han realizado para ahondar y obtener más resultados para el análisis y el contraste con el modelo numérico.

Aunque el fenómeno de humedecimiento e inundación que serían lo opuesto a la desecación no es el tema central de esta tesis, se estudia en la vertiente experimental. Se presentan los primeros resultados obtenidos respecto del humedecimiento e inundación. Por otro lado, se incluyen los primeros trabajos de auscultación mediante técnicas de georadar realizados en la UPC.

Finalmente, la teoría mencionada arriba permite escribir la formulación del problema en términos de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales (EDPs). Este sistema de ecuaciones se resuelve mediante el MEF, el Método de las Diferencias Finitas (MDF) y la RM clásica, añadiendo algunos conceptos de la MFLE en su versión computacional.

La retracción durante la desecación queda claramente explicada teóricamente, experimentalmente y a través del modelo numérico. Las razones del inicio de las grietas son esquivas y múltiples, ciertas condiciones en tensiones quedan comprobadas a lo largo de los resultados tanto experimentales como numéricos. Otras razones permanecen oscuras y sin explicación.

Desde el punto de vista teórico y/o numérico, se dispondrá de una herramienta de trabajo que permita, mediante la simulación por ordenador, realizar estudios de la influencia de las condiciones de contorno de las muestras, análisis de tensiones, variación de la porosidad, grado de saturación, etc. sin necesidad de recurrir a ensayos. Ello puede tener una gran utilidad, principalmente por el ahorro económico y de tiempo con respecto a métodos más convencionales, y también porque la información obtenida en esta forma es completa (*es decir, todas las variables en todos los puntos*), contra los métodos experimentales en los que sólo se pueden tomar unas pocas medidas. Asimismo, la simulación numérica puede ser la única forma de obtener resultados en casos de ensayos difícilmente factibles experimentalmente con las técnicas actuales.

1.6. Metodología e Hipótesis de Trabajo

El trabajo que se propone, se basa en cuatro hipótesis fundamentales, basadas a su vez en trabajos previos en esta línea de investigación (Ávila, 2004; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, 2009), las cuales son consistentes también con otros trabajos presentados en la literatura científica (Konrad & Ayad, 1997a; Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995):

- 1) *La evolución de la desecación y retracción en la masa de suelo se puede estudiar mediante un modelo hidromecánico basado en el equilibrio de la matriz de suelo no saturada y el balance de agua que fluye a través de los poros.*
- 2) *La iniciación de las grietas está controlada por las condiciones de presión intersticial del suelo (es decir, por la succión), y por su estado de tensiones. Cuando la tensión principal menor en un punto sobrepasa la resistencia a tracción del suelo se inicia la fisura (Griffith, 1924).*
- 3) *La propagación de la grieta se produce siguiendo criterios de RM (se supera la resistencia a tracción del suelo) y elementos de la Mecánica de Fractura (Modos de fractura, dirección de propagación, longitud de propagación, criterio de estabilidad de fisuras, etc.).*
- 4) *El fenómeno global de fisuración depende de las condiciones de contorno y de las condiciones medioambientales (temperatura, humedad, viento, etc.) existentes y de sus variaciones en el tiempo.*

Respecto de la aproximación teórica podemos decir que como toda la materia del universo los suelos arcillosos son discontinuos. Los suelos arcillosos están formados por partículas perfectamente identificables. Esto parece ir en contra de la hipótesis fundamental de la Mecánica de los Medios Continuos pero esta teoría ha demostrado infinidad de veces su eficacia para el tratamiento de los procesos no solo en suelos sino en cualquier otro material usado en ingeniería. Dentro de esta disciplina general podemos incluir a la Mecánica de Suelos (*saturados y no saturados*) como marco teórico de trabajo. Dentro de la Mecánica de Suelos, el Flujo en Medios Porosos Deformables nos da apoyo para la resolución de parte del problema, la retracción por desecación. Para el tratamiento del inicio y la propagación de las grietas utilizamos los conceptos de la RM y elementos de la MFLE. Para la determinación del lugar y momentos del inicio de la grieta hacemos una aproximación determinista. Para resolver el problema mediante la Mecánica de los Medios Continuos, se necesita establecer una relación tensión deformación en los suelos, para ello se utiliza el concepto de Superficies de Estado. Por otro lado, la ecuación de

Darcy es necesaria para establecer la relación constitutiva hidráulica. Además, se establecen las condiciones de contorno adecuadas en el tiempo y en el espacio.

Desde el punto de vista experimental, basándonos en un extenso programa de laboratorio realizado previamente, se avanza en el estudio de desecación de muestras de suelo (*arcilla roja limosa de Barcelona*) para dilucidar y comprender mejor el proceso bajo condiciones controladas y contrastarlo con lo observado en el campo y dar soporte para la validación del modelo numérico. Se ha mejorado el equipo de cámara ambiental preexistente y se han ensayado nuevas muestras. Se presentan por primera vez resultados de procesos de humedecimiento e inundación y su efecto sobre la succión en determinados puntos de la muestra. Se da una mayor importancia al análisis de los efectos en los contornos de las muestras. Como avance adicional se presentan resultados de auscultación de las muestras de suelo sometidas a desecación mediante técnicas de georadar.

Desde el punto de vista numérico, centrándonos primeramente en el problema de retracción y flujo de agua en medios porosos deformables, tenemos muchas variables con las cuales debemos trabajar. Temperatura, succión (*presión negativa de poros*), desplazamientos (*y las deformaciones asociadas*), tensiones, resistencia (*a tracción y al corte*), grado de saturación, etc. Esto nos lleva a pensar en la necesidad de plantear un modelo termo-hidro-mecánico acoplado. Este tipo de modelos están basados en la resolución de las EDPs, que surgen de la MMC y las correspondientes ecuaciones constitutivas mediante el MEF y/o el MDF. En el presente trabajo se presenta sin embargo un modelo hidromecánico para quitar complejidad al modelo numérico de flujo. Se ha visto que a pesar de esta simplificación, el modelo es suficiente para simular los procesos en dos dimensiones.

En cuanto a la fisuración se utiliza la RM clásica y conceptos de la MFLE computacional para predecir ciertos tipos de grietas debido a concentraciones de tensiones en puntos críticos bajo ciertas condiciones de contorno.

En la Figura 1.12 se esquematiza el enfoque para abordar el problema en este trabajo. La realidad compleja del fenómeno de desecación y agrietamiento sólo se puede estudiar de forma aproximada desde las tres vertientes propuestas. El análisis experimental reproduce el fenómeno en un ambiente controlado. Las teorías por medio de sus hipótesis permiten interpretar la realidad en el campo y en el laboratorio. La teoría permite definir el problema y plantear las ecuaciones necesarias para su simulación. La simulación confirma que la teoría es adecuada simulando los procesos estudiados en el laboratorio. Cada vertiente se relaciona la una con la otra refinando la comprensión y la aproximación al problema físico.

Es preciso comentar que cuando se propone una teoría y máxime cuando es necesario el uso de métodos numéricos para resolver el modelo, hay que hacer una serie de hipótesis que nos alejan de la realidad. En la actualidad, en materia de modelo numérico lidiamos con problemas del propio método antes que con el problema físico en sí mismo.

Para comprender cabalmente que ocurre en un fenómeno como la desecación, es necesario ir a la microestructura del suelo y su interacción con la fase fluida. El modelo propuesto aquí es de carácter macroscópico y geotécnico. Además, ha resultado ser un buen marco de trabajo para ahondar en la comprensión del proceso y es prometedor en la resolución de problemas prácticos.

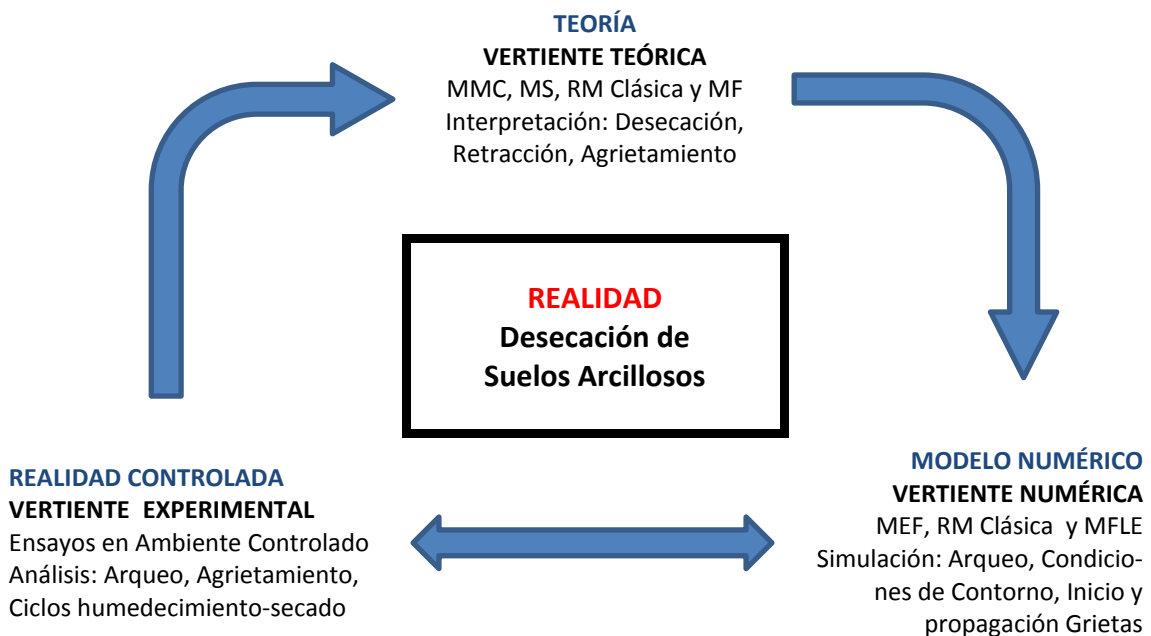


Figura 1.12 - Enfoque del problema de desecación en suelos

Finalmente debemos citar a Karl von Terzaghi:

"Desafortunadamente, los suelos han sido fabricados por la naturaleza y no por el hombre, y los productos de la naturaleza son siempre complejos ... Tan pronto como se pasa del acero y el hormigón al suelo, la omnipotencia de la teoría deja de existir. El suelo natural nunca es uniforme. Sus propiedades cambian de punto a punto, mientras que nuestro conocimiento de sus propiedades se limita a los pocos sitios en los que las muestras han sido recogidas. En la mecánica de suelos la exactitud de los resultados calculados nunca supera a la de una estimación aproximada, y la función principal de la teoría consiste en que nos enseña qué y cómo observar en el campo"

"Si he logrado ver más lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes"

Bernardo de Chartres (siglo XII) y Sir Isaac Newton (1642-1727)

Capítulo 2

Estado del Arte

El estudio de problemas geotécnicos puede ser desarrollado desde tres vertientes fundamentales: experimental, teórica y numérica. El estudio experimental es quizás el más directo ya que monitorea, en el campo o en el laboratorio, el desarrollo del fenómeno utilizando equipamiento que permite controlar y medir las variables involucradas en el proceso. El marco teórico es general e intenta dar una explicación de los procesos mediante hipótesis que permiten formular el problema en términos de ciertas ecuaciones que se deben resolver. Las ecuaciones provenientes del marco teórico, son en general ecuaciones en derivadas parciales, cuya solución se puede encontrar numéricamente para los casos de interés práctico. Las simulaciones numéricas que están basadas en el marco teórico, y calibradas con los ensayos de laboratorio, permiten estudiar sistemáticamente los procesos para ahondar en la comprensión de los fenómenos.

Para un estudio serio de los procesos de desecación, retracción y agrietamiento es necesario recurrir a las tres vertientes mencionadas. En este capítulo se presenta el Estado del Arte en el tema de desecación, retracción y agrietamiento distinguiendo precisamente trabajos que estudian el problema desde los tres puntos de vista de manera separada o bien en combinación. Se sigue una secuencia cronológica y se introducen una serie de conceptos.

En la vertiente experimental, quedan definidos los antecedentes, las distintas variantes del proceso tal y como se presenta en el laboratorio o en el campo, los objetivos de los estudios realizados, los tipos de suelo usualmente utilizados, las variables geotécnicas involucradas, la forma de preparación de los materiales, los resultados obtenidos, etc. Los resultados de la vertiente experimental incluyen retracción y

agrietamiento, arqueo, estudio de muestras delgadas, ensayos sin restricción, estudio de la influencia del espesor de las muestras, muestras cilíndricas, resistencia a tracción y materiales distintos a la arcilla.

En lo referente a las teorías, se presenta el Estado del Arte a través de varios trabajos que muestran cronológicamente el aumento de complejidad en cuanto a conocimiento y herramientas utilizadas para el estudio del fenómeno. Se parte de los modelos elásticos, más simples conceptualmente pero que permiten soluciones analíticas y fuertes hipótesis como espacio semi-infinito, hasta modelos acoplados y que deben ser resueltos mediante técnicas numéricas. Se exploran modelos basados en la elasticidad, la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) y la Resistencia al corte. Además, se estudian las características de la retracción en suelos arcillosos, la Mecánica de Fractura (MF) y la propagación de grietas, predicción de los perfiles de succión en el suelo durante la desecación, predicción del inicio y propagación de la grieta y su longitud. Se presenta la interpretación geométrica (probabilista) de los patrones de agrietamiento como también la interpretación geomecánica (determinista).

Respecto de la vertiente numérica, se presentan varios trabajos que demuestran lo complejo de resolver la interacción existente entre el problema hidromecánico (dsecación y retracción) y el problema de agrietamiento, además de otras interacciones (por ejemplo: resistencia y rigidez en función del grado de saturación). Se presentan los modelos distinguiendo entre distintos métodos de aproximación numérica utilizando tanto códigos comerciales como académicos. Se presentan trabajos que atacan el problema utilizando diferentes métodos como el Método de las Diferencias Finitas (MDF), el Método de los Elementos Finitos (MEF), el Método del Elemento Distinto (MED) y el Método de los Elementos Discretos (DEM).

Al final del capítulo se presentan las conclusiones respecto de donde se encuentra la investigación teórica, experimental y numérica en este campo y así poder establecer la mejor metodología para avanzar en el estudio de este problema.

2.1. Introducción

De una manera simplificada podemos decir que el fenómeno de desecación y agrietamiento de suelos consiste en la pérdida de humedad de la masa de suelo debido a ciertas condiciones externas que producen a la vez retracción y agrietamiento, motivadas por un cambio en el estado de tensión de la matriz de suelo. Como consecuencia de esto, se producen cambios en las propiedades del suelo volviéndose en general mucho más permeable y menos resistente a cargas externas. Esto a su vez, trae consecuencias desde un punto de vista funcional ya sea hidráulico o estructural.

Los científicos estudian hace décadas este complejo fenómeno estudiándolo desde todas las vertientes posibles. En el mundo geotécnico existen aportes de índole teórico, experimental y numérico. En esta tesis interesan sobre todo las teorías que enmarcan el problema dentro de la Geotecnia, Mecánica de Suelos (MS). En lo que se refiere a experimentación, se han estudiado y se estudian actualmente procesos en el campo (a gran escala) y en el laboratorio (a pequeña escala). En el último caso se suelen estudiar muestras de diferentes tamaños, desde unos pocos milímetros a órdenes de varios decímetros. Las muestras suelen ser circulares o rectangulares, pero hay variantes como formas prismáticas en doble T (Ávila, 2004), de pequeño espesor o bien muestras de gran volumen en condiciones ambientales generalmente controladas (Konrad & Ayad, 1997a; Kodikara, et al., 2000; Ávila, 2004; Nahlawi & Kodikara, 2006; Peron, et al., 2007; Lakshmikantha, 2009; Peron, et al., 2009; Shin & Santamarina, 2011; Costa, et al., 2013; entre otros).

La resistencia a tracción del suelo ha sido estudiada llegando a la conclusión que depende del contenido de humedad o del grado de saturación del suelo y por lo tanto de la succión (Rodríguez, 2002).

También se ha estudiado mucho la morfología de las grietas mediante técnicas de análisis de imágenes buscando trabajar con variables más manejables y no intentar reproducir exactamente los patrones de grietas lo cual sería en principio imposible (Vogel, et al., 2005; Yesiller, et al., 2000; Tang, et al., 2008; Serra, 1982).

Desde el punto de vista teórico: (Lachenbruch, 1961; Morris, et al., 1992; Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995; Konrad & Ayad, 1997b) y numérico: (Lee & K.W. Lo, 1988; Ayad, et al., 1997; Prat, et al., 2002; Rodríguez, et al., 2007; Aruna & Kodikara, 2011; Trabelsi, et al., 2012), se han presentado muchos trabajos que involucran a la Elasticidad, Plasticidad, al MEF (y otros

como el Método de Diferencias Finitas (MDF), Elementos Junta, Elementos Discretos, Elementos Distintos, Elementos Cohesivos, etc.) y la MF.

Al día de hoy existen alrededor de mundo varios centros que investigan el fenómeno de grietas por desecación en suelos desde la vertiente experimental, entre otros: el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad de Monash en Australia (Nahlawi & Kodikara, 2006; Costa, et al., 2013); el Laboratorio de Mecánica de Suelos (LMS) de la EPFL en Suiza (Peron, et al., 2009); la Escuela de Ingeniería Civil Ambiental de Ulsan Korea y el Instituto de Tecnología de Georgia en USA (Shin & Santamarina, 2011); la Escuela de Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Nanjing en China (Tang, et al., 2011); el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC en España (Lloret, et al., 1998; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, et al., 2006; Levatti, 2012; Prat, et al., 2013). Desde la vertiente teórica y numérica: La URS Corporation en Denver, Colorado USA (Inci, 2008); el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad de Monash en Australia (Amarasiri & Kodikara, 2013); el Laboratorio de Mecánica de Suelos (LMS) de la EPFL en Suiza y la Universidad de Montpellier en Francia (Peron, et al., 2009); la Escuela de Conservación de Agua e Ingeniería Hidroeléctrica de Wuhan China y el Departamento de Ingeniería del Terreno de Shanghai, China (Sima, et al., 2013); el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC en España (Prat, et al., 2002; Rodríguez, et al., 2007; Levatti, et al., 2009).

A pesar del enorme aporte de todos estos centros e investigadores, el fenómeno de agrietamiento en suelos sigue siendo una línea de investigación abierta y un tema que involucra a los distintos campos del conocimiento. Se trata de una investigación fundamental que intenta descubrir y comprender cuales son los mecanismos y las variables internas que son capaces de explicar las razones del fenómeno y poder así predecir de qué manera se producirá dado un caso particular (deposito minero, radiactivo, balsas de tierra, etc.).

Se presentan en este capítulo, algunos de los resultados más importantes de la literatura obtenidos tanto en el campo como en el laboratorio (enfoque experimental), respecto del problema de la desecación y agrietamiento de suelos arcillosos. Usualmente, los trabajos experimentales proponen algún marco teórico para la interpretación de los fenómenos.

La finalidad de este capítulo es resumir lo que podemos inferir a partir de las experiencias realizadas en los trabajos antes mencionados, mostrar la continuidad que da esta tesis a dichos estudios y presentar unas conclusiones respecto del enfoque teórico, experimental y numérico para la investigación del presente fenómeno. En especial, esta tesis es una continuidad de la línea de investigación en grietas por desecación del Departamento de Ingeniería del Terreno de

la UPC, (Lloret, et al., 1998; Ávila, et al., 2002; Ávila, 2004; Prat, et al., 2002; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, et al., 2006; Levatti, et al., 2009a; Levatti, et al., 2009b; Prat, et al., 2013; etc.), en donde se viene trabajando hace más de 15 años en el tema.

Cronológicamente, la experimentación en desecación arranca a principios del siglo 20 juntamente con la MS. Posteriormente, evoluciona con la MS Saturados y no Saturados. Las teorías para explicar el proceso se van haciendo más complejas y generales. Se introducen posteriormente conceptos de MF para explicar y modelar el agrietamiento. A lo largo del tiempo se proponen teorías en tensiones totales y en tensiones efectivas. Se proponen los primeros modelos basados en la Mecánica de los Medios Continuos (MMC), problema hidromecánico, acoplados con el problema de la fractura en suelos. Debido a la complejidad del problema planteado se añade la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) para simular el agrietamiento implementándola en códigos tanto comerciales como académicos y se desarrollan varias estrategias para simular el agrietamiento. Como se ve en la Figura 2.1 la vertiente experimental es la más antigua y la más nutrida. Le sigue la vertiente teórica que en su desarrollo fue haciéndose cada vez más compleja a la vez que más precisa pero que ha ido necesitando el soporte de la simulación para poder ser resuelta.

2.2. Definiciones

A lo largo del estudio del problema de desecación en suelos, distintos autores han intentado definir qué se entiende por desecación y agrietamiento debido a desecación. En la siguiente sección se presentan algunas definiciones respecto del término “agrietamiento” e “inicio de agrietamiento” y se dan las referencias correspondientes.

2.2.1. Definiciones de Agrietamiento

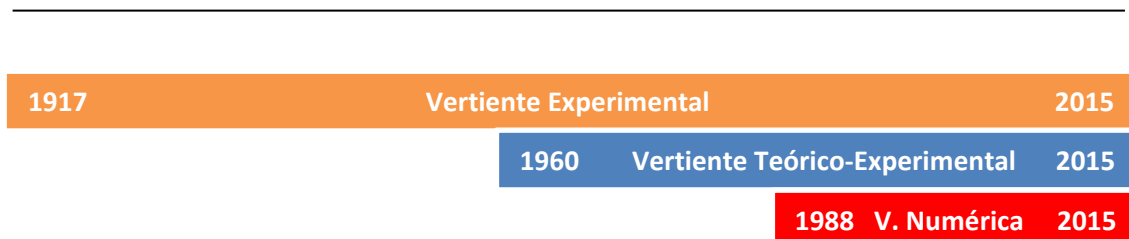


Figura 2.1 – Vertientes Experimental, Teórico-Experimental y Numérica del Estudio de Desecación y Agrietamiento en Suelos desde hace casi 100 años.

Se ha mencionado en la introducción de esta tesis, que el problema de desecación no siempre conduce a un problema de agrietamiento. Sin embargo, debido a la importancia que tiene el agrietamiento, se ha intentado definir este proceso de la mejor manera posible. Algunas definiciones al respecto en la literatura son las siguientes:

“Los suelos contraíbles a menudo se agrietan cuando se secan. El agrietamiento ocurre bajo diferentes condiciones y no pueden explicarse de la misma manera (Towner, 1987b)”.

“El agrietamiento en suelos sometidos a desecación está controlado por la succión y por las propiedades del suelo tal como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la resistencia al corte, la resistencia a tracción y la energía superficial específica (Morris, et al., 1994)”.

“La respuesta mecánica de la arcilla viene dada por su fábrica así como también por sus defectos o discontinuidades que pueden existir en el material. Estos defectos, a menudo en forma de grietas e inclusiones, desembocan en bandas de corte que crecen desde las grietas y forman una zona en la cual la deformación es localizada (Sadda, et al., 1994)”.

“El agrietamiento es un problema de fractura, el cual no es abordado adecuadamente mediante una aproximación donde la falla se define en términos de resistencia a tracción (Harrison & Hardin, 1994)”.

“Las grietas son el resultado de un desequilibrio interno en la masa de suelo causado por la distribución no uniforme de la humedad, temperatura o la distribución de la energía de compactación durante la construcción (Fang, 1997)”.

“El inicio del agrietamiento y propagación en suelos es un problema complejo que involucra mecanismos de localización de deformaciones y flujo de agua en medios saturados y no saturados, así como también su interacción (Prat, et al., 2002)”.

2.2.2. Definiciones de Inicio de Agrietamiento

Un instante clave en el proceso de agrietamiento es el inicio de la grieta y este fenómeno se ha intentado definir también en la literatura. Se presentan a continuación algunas de esas definiciones:

“Se ha visto que las grietas comienzan en el centro de la capa de suelo y se propagan hacia la superficie o hacia el fondo con velocidad no uniforme (Corte & Higashi, 1960)”.

“Las grietas se inician generalmente en la superficie de mayor tracción (a menudo en o cerca de la superficie) y se propagan hacia el interior del medio donde la tracción disminuye y en último caso pasan a ser una compresión (Lachenbruch, 1961)”.

“El desarrollo de tensiones de tracción significativas causa grietas por tracción en zonas bien definidas en suelos frágiles (Lee & K.W. Lo, 1988)”.

“El suelo se seca generalmente hacia abajo desde la superficie, donde la matriz de succión es generalmente mayor y las tensiones debidas al peso propio son cero. Las micro-fisuras que están presentes en la masa de suelo en forma de vacíos entre partículas se encuentran presentes también en la superficie. Así, las condiciones para que las grietas crezcan son más favorables en la superficie del suelo (Morris, et al., 1992)”.

“Durante la desecación las grietas comienzan desde el fondo y se propagan verticalmente hacia la superficie y lateralmente hacia las grietas adyacentes (Weinberger, 1999)”.

2.3. Vertiente Experimental

En este apartado se presenta la vertiente experimental del problema de desecación. La exposición es cronológica pero desarrollando distintos aspectos del problema. Se parte de los antecedentes más antiguos distinguiendo entre retracción y agrietamiento. Se definen los objetivos de los estudios experimentales, los tipos de suelo en los que se presenta el fenómeno, las variables involucradas y la manera de preparar los ensayos. Finalmente, se presentan algunos resultados logrados en ambiente de laboratorio, además de resultados obtenidos en el campo.

Se utilizan para hilar la exposición principalmente cuatro artículos de revista (Konrad & Ayad, 1997a; Nahlawi & Kodikara, 2006; Peron, et al., 2009; y Costa, et al., 2013); dos tesis doctorales (Ávila, 2004 y Lakshmikantha, 2009); dos artículos de congreso (Kodikara, et al., 2000 y Nahlawi & Kodikara, 2002); un reporte de investigación Corte & Higashi, (1960) y una tesis de master Lau, (1987). Estos dos últimos clásicos trabajos, constituyeron una base firme para todo el desarrollo posterior en materia experimental y teórica.

2.3.1. Primeros Antecedentes

En este Estado del Arte se toma como primer referencia el trabajo de Corte & Higashi (1960) y la tesis de master de Lau (1987). Se presenta un resumen de los antecedentes presentados en estos dos trabajos.

2.3.1.1. Retracción de Suelos

Las referencias más antiguas respecto de grietas por desecación aparecen en el trabajo de Corte & Higashi (1960). En este reporte de investigación se cita el trabajo de Kindle (1917). En dicho trabajo se hicieron experimentos a pequeña escala. El problema de estos primeros trabajos fue que tuvieron solo un carácter cualitativo.

En el problema de desecación se establecen dos fenómenos diferenciados, **la retracción** y **el agrietamiento** que muchas veces van enlazados aunque a veces solo hay retracción y no agrietamiento. Desde hace casi 100 años se ha empezado a estudiar de manera sistemática el proceso y se han concluido diversas cuestiones como por ejemplo:

“La retracción responde a un cambio en el estado de tensiones que depende del uso del suelo y las condiciones climáticas”. (Haines, 1923).

La fábrica de la arcilla influye en el grado de retracción *“Arcillas con partículas orientadas se retraen más en la dirección perpendicular de las láminas y menos paralelas a ellas. En arcillas con partículas orientadas al azar la retracción es igual en todas las direcciones”.* (Lambe, 1958).

“La cantidad de retracción depende del tipo y cantidad de minerales de arcilla, la fábrica, el contenido de agua inicial y la presión de confinamiento”. (Mitchel, 1976).

“La adición de arena reduce el grado de retracción”. (Gokhale & Anandakrishhan, 1970; Kleppe & Olson, 1985).

“El tipo de fluido en los poros también puede tener influencia en el grado de retracción (caolinita mezclada con tetra-cloruro de carbono, fluido orgánico)”. (Sridharan & Rao, 1971).

2.3.1.2. Retracción y Agrietamiento

En cuanto a la retracción con agrietamiento se han establecido algunas conclusiones como son:

“La sinéresis es un proceso coloidal donde las partículas se agrupan por acción de fuerzas atractivas expeliendo parte del agua presente e induciendo el agrietamiento” (Skempton & Northey, 1952; y White, 1961).

“En regiones con permafrost se producen tensiones debido a la retracción térmica de las superficies congeladas y causan fracturas. El agua rellena estas fisuras y luego al congelarse en invierno, producen cuñas de hielo de considerable grosor luego de varios ciclos estacionales”. (Lachenbruch, 1962).

“La succión osmótica, debido a la salinidad del agua puede producir consolidación, retracción y agrietamiento”. (Barbour, 1986; y Burst, 1965).

“Muestras de arcilla compuestas mayoritariamente por montmorillonita e illita reducen su volumen al congelarse si tienen un grado de saturación menor al 90% y expanden para grados de saturación mayores a 90%”. (Hamilton, 1966).

2.3.1.3. Patrón de Agrietamiento

Otro aspecto muy estudiado es el patrón de grietas final y su evolución durante el proceso de desecación con retracción y agrietamiento:

La principal causa del agrietamiento es la retracción (Washburn, 1956). En su trabajo, (Twenhofel, 1950) estableció que el espaciado entre grietas depende del carácter del lodo, de la tasa de secado, del espesor de la muestra, del carácter del agua, del material que está debajo del lodo y de la presencia de material extraño en la mezcla. Sin embargo, no presenta resultados cuantitativos. Hubo otros varios estudios de agrietamiento, en otros campos del conocimiento, pero siempre producidos por tensiones debido a cargas externas. *“Las grietas por desecación se distinguen porque se producen a medida que el medio pierde masa por evaporación”* (Corte & Higashi, 1960).

“Los polígonos con tres a cinco lados son más abundantes”. (Twenhofel, 1950). *“La desecación produce polígonos con patrones ortogonales y los hexagonales son la excepción”* (Brenner, et al., 1981). En el trabajo de Corte & Higashi (1960) se encontró que predominan los polígonos de 4 y 5 lados y que en general se forman intersecciones a 90 grados. En el artículo de (Lachenbruch, 1962) se denominó a los sistemas de grietas sistemas ortogonales (grietas a 90 grados) y no ortogonales (grietas generalmente a 120 grados). Los primeros se presentan según Lachenbruch en suelos heterogéneos o plásticos sometidos a concentraciones de tensiones y los segundos en suelos homogéneos poco plásticos sometidos a campos de tensión uniformes.

2.3.1.4. Espaciado y Profundidad de las Grietas

Finalmente, desde un punto de vista ingenieril, lo importante es poder evaluar las dimensiones que presentarán las grietas en un proceso de retracción y agrietamiento. Desafortunadamente, este es un problema complejo de abordar y en los primeros años solo se ha podido establecer dichas dimensiones de manera cualitativa:

“Se han reportado grietas de unos pocos milímetros y también grietas del orden de metros tanto en profundidad como en separación de grietas”. (Longwell, 1928; Simpson, 1936; Jahn, 1950; Knechtel, 1952; y Willden & Mabey, 1961) entre otros.

2.3.2. Variables Involucradas y Objetivos de los Estudios Experimentales

El objetivo del trabajo experimental es conducir experimentos para establecer relaciones cualitativas y/o cuantitativas entre las variables que gobiernan el fenómeno en estudio.

En el trabajo de Corte & Higashi (1960) se definieron *factores extrínsecos*: temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar y velocidad del viento. La profundidad del nivel freático se descartó por limitaciones de infraestructura de los ensayos. También se definieron *factores intrínsecos*: humedad del suelo y su distribución espacial y temporal, grado de confinamiento, composición física y química del suelo. El objetivo de este trabajo fue conducir experimentos para establecer relaciones cuantitativas entre patrones de agrietamiento y distintas condiciones de los ensayos con condiciones controladas. Luego de un cuarto de siglo intentando comprender cuál es el mecanismo de desecación y agrietamiento, Lau (1987) ha presentado una tesis de master cuyo objetivo fue estudiar los mecanismos de desecación y agrietamiento en suelos para proponer un modelo matemático capaz de predecir la profundidad de las grietas.

Un artículo presentado por Kodikara, et al. (2000) hace una revisión de los trabajos de Corte & Higashi (1960) y Lau (1987). Los experimentos estuvieron diseñados para estudiar el efecto de los espesores de las muestras, la densidad inicial, el material de la base de los moldes y la tasa (velocidad) de secado. Todos los trabajos mencionados arriba utilizaron para el estudio bandejas rectangulares de dimensiones cercanas al metro cuadrado y de espesores que van desde el centímetro hasta casi dos decímetros.

En su trabajo, Nahlawi y Kodikara (2002), estudian el fenómeno de arqueo en pequeñas muestras rectangulares alargadas de suelo arcilloso muy plástico. Para ello reducen todo lo

posible la adherencia con los moldes para evitar restricciones en la deformación y su posterior agrietamiento. Posteriormente, Nahlawi y Kodikara (2006), estudian muestras de dimensiones similares (del orden de los 100 centímetros cuadrados), pero permitiendo las restricciones impuestas por las bandejas lo cual permite el agrietamiento. Este tipo de ensayo, repetido luego por varios autores como Peron, et al. (2009), estudian muestras de pequeñas dimensiones y delgadas, lo cual permite tener menos variables y una mejor cuantificación del agrietamiento que se produce usualmente solo en la dirección transversal de las muestras que son alargadas con relaciones de longitud 1:10 aproximadamente.

Tesis doctorales como la de Ávila (2004), estudian la retracción y el agrietamiento de forma exhaustiva desde la vertiente experimental. Análisis microscópicos y macroscópicos de los procesos, ensayos en muestras pequeñas circulares en cámara ambiental, bandejas que controlan condiciones de contorno debido a su forma. Este trabajo propone además una teoría para explicar los procesos y analiza la aplicación de la MF para comprender el problema. Por otro lado cuantifica propiedades como la tenacidad a la fractura para hacer posible la aplicación de dicha teoría. La tesis de Lakshmikantha (2009), presenta un extenso programa experimental sistematizando el trabajo en el laboratorio. Además, presenta el diseño y construcción de equipamiento específico para el estudio del problema: la Cámara Ambiental. Dicha Cámara, está instrumentada para controlar las principales variables del problema. Se establece la existencia del efecto del tamaño de la muestra. Se cuantifican parámetros y propiedades de fractura así como también se cuantifica la relación entre la resistencia a tracción y la succión.

2.3.3. Tipos de Suelos Utilizados en los Ensayos

El problema de retracción, arqueado y agrietamiento debidos a desecación es un problema que se presenta en suelos de tipo arcilloso o limo-arcilloso. Las arenas en general no presentan agrietamiento. Los suelos que son propensos a agrietar o deformarse sensiblemente ante cambios de humedad son variados.

Algunos ejemplos de suelos utilizados para el estudio de la desecación y agrietamiento se presentan a continuación.

En el trabajo de (Corte & Higashi, 1960) por ejemplo, se ha utilizado el suelo “Bloomington Till”, suelo arcilloso, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Características del suelo utilizado por (Corte & Higashi, 1960). “**Bloomington Till**” (tamaño máximo de partículas 1 mm) en Illinois, USA.

Gravedad Específica	2.63 g/cm ³
Límite Líquido (w_L)	31.4%
Límite Plástico (w_P)	13.9%
Índice Plástico (I_P)	17.5%
Límite de Retracción (w_s)	12%
Contenido de Humedad en el Campo	22.2%
Color	Marrón

Tabla 2.2 – **Arcilla de Werribee** (Nahlawi & Kodikara, 2002)

Gravedad Específica	2.66
Límite Líquido (w_L)	127%
Límite Plástico (w_P)	26%
Índice Plástico (I_P)	101%
Límite de Retracción (w_s)	22%
Porcentaje que pasa el tamiz de 75µm	96%

Tabla 2.3 - Características del suelo utilizado en (Peron, et al., 2009)

	Bioley Silt	Sion Silt	La Frasse Clay
Límite Líquido (w_L)	31.8%	25.4%	30.7%
Límite Plástico (w_P)	16.9%	16.7%	20.3%
Límite de Retracción (w_s)	20.5%	24.9%	-
Peso Específico Seco (γ_s)	27.1 kN/m ³	27.4 kN/m ³	26.8%
Tamaño Máximo de Partículas	< 90 µm	0.5 mm	0.4 mm
Contenido de Illita	10%	8%	-
Contenido de Esmeclita	10%	-	-
Contenido de Clorita	5%	8%	-
Succión de Entrada de Aire en kPa	120	55	300
Contenido de Agua para el Valor de Entrada de Aire	22.5%	24.9%	
Succión en el Límite de Retracción	200 kPa	35 kPa	

En la tesis de master de (Lau, 1987), se utilizaron para los ensayos un sedimento glacial (Indian Head Till) y una arcilla (Regina Clay). Ambos suelos se secaron, se desmenuzaron con martillo de goma y se tamizaron para dejar solo partículas de 2mm o menos (Tamiz N°10). Las características de la arcilla utilizada son las que se muestran en la Tabla 2.2.

En su artículo, (Peron, et al., 2009) utiliza para su estudio tres tipos de suelos: “Biolet Silt”, “Sion Silt” y “La Frasse Clay”. Estos limos arcillosos y arcilla tienen las propiedades que se resumen en la Tabla 2.3. En el artículo de (Rodríguez, et al., 2007) se presenta un análisis experimental y numérico del agrietamiento producido en residuos mineros. Esto implica que el problema no se centra solo en suelos naturales sino también en productos industriales como son

los residuos. El contenido de metales pesados confiere a este tipo de residuos una densidad que suele ser varias veces superior a la de los suelos naturales.

En el trabajo de (Costa, et al., 2013), se utilizaron dos tipos de arcilla. La primera, “Merri Creek Clay”, del noreste de Melbourne, que es una arcilla expansiva. Una descripción de esta arcilla puede encontrarse en (Frood, 1992), donde se dice que es extremadamente densa y pegajosa de color gris o negro. Fue utilizada en otros trabajos como (Chan, et al., 2007). Esta arcilla fue sometida a desecación en cámara controlada y bajo la acción de lámparas de 500W en contenedores circulares de vidrio de 140 mm de diámetro y 3, 5, 10 y 20 mm de espesor. La segunda, arcilla de Werribee, del oeste de Melbourne es una arcilla altamente reactiva de origen basáltico y tiene un gran potencial de retracción y expansión. Más detalles se pueden encontrar en (Kodikara, et al., 2004; Nahlawi, et al., 2004; y Nahlawi & Kodikara, 2006). Esta arcilla se secó en moldes cuadrados de 80 mm x 80 mm. Se utilizó además almidón de patata industrial usado para cocinar en moldes circulares de 140 mm de diámetro y 10, 20 y 30 mm de espesor. Finalmente se usó también arena de cuarzo molida comercial. Sus partículas miden entre 63 y 75 μm .

2.3.4. Tipos de Contenedores

Se puede decir que existen dos grandes grupos de ensayos relacionados con la desecación y agrietamiento en suelos, los ensayos en el campo (delimitando una zona de estudio) y los ensayos de laboratorio en contenedores de varios tipos y tamaños.

En el laboratorio se utilizan básicamente dos tipos de contenedores: circulares (de sección circular que contienen una muestra cilíndrica de suelo) y rectangulares (de sección rectangular y que contienen muestras prismáticas). Los tamaños y formas son variados según cual sea el objetivo del estudio.

Pequeñas bandejas circulares de unos pocos centímetros de diámetro y unos milímetros de espesor han sido utilizadas en variadas ocasiones para estudiar el fenómeno de desecación (Kindle, 1917; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, 2009). Las pequeñas dimensiones permiten utilizar hornos o bien pequeñas cámaras ambientales para acelerar el proceso de secado con temperatura o utilizando soluciones que aceleran el proceso de desecación.

Las bandejas rectangulares han sido utilizadas desde el principio debido a que se puede buscar alguna relación entre las dimensiones de las bandejas y los patrones de agrietamiento. Los

tamaños utilizados han variado pero en general se utilizan bandejas que tienen una superficie que ronda hasta el metro cuadrado. Corte & Higashi (1960) han utilizado bandejas rectangulares de $60\text{ cm} \times 84\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ y $87\text{ cm} \times 122\text{ cm} \times 15\text{ cm}$; Lau (1987) utilizó bandejas cuadradas de $61\text{ cm} \times 61\text{ cm} \times 7.6\text{ cm}$; Lakshmikantha (2009) utilizó entre otras una serie de bandejas rectangulares con dimensiones del formato de papel A0-A4 y espesores de muestra de 1 y 2 cm.

Cierto control en los patrones de agrietamiento puede lograrse jugando con las formas de los contenedores. Así por ejemplo, (Ávila, 2004), ha estudiado la desecación y agrietamiento en contenedores con forma prismática en doble T, en los cuales se pueden identificar grietas primarias, secundarias y terciarias con cierta facilidad. Además, es posible identificar los mecanismos de tensión que producen dichas grietas.

Para simplificar el estudio se utilizan muchas veces bandejas que presentan una relación de lados grande (aproximadamente 1:10) para forzar el agrietamiento en una sola dirección (Nahlawi & Kodikara, 2006; y Peron, et al., 2009; entre otros). Estos autores además utilizaron bandejas de unos 200 mm de longitud e igual relación de lados pero intentando reducir al mínimo la adherencia entre suelo y recipiente durante el proceso de desecación.

La adherencia entre contenedor y suelo provoca restricciones que pueden producir agrietamiento. Así pues, el material del que esté hecha la bandeja tiene influencia puesto que la adherencia es diferente. Se han utilizado contenedores con base de madera o vidrio (Corte & Higashi, 1960), de plexiglás o materiales similares como en (Nahlawi & Kodikara, 2006) o de PVC (Lakshmikantha, 2009).

2.3.5. Resultados de los Ensayos de Laboratorio

Podemos decir que el primer trabajo sistemático respecto de la desecación de suelos fue el de Corte & Higashi (1960). Junto con el trabajo de Lau (1987) han definido de alguna manera la forma de trabajar en el laboratorio para estudiar este problema.

2.3.5.1. Retracción y Agrietamiento

En el trabajo de Corte & Higashi (1960), se ha visto que hay una relación lineal entre el tiempo necesario para la aparición de la primera grieta y el espesor de la muestra de suelo en el caso de suelo compacto (Figura 2.2). Los suelos más sueltos tienden a un valor constante del tiempo en que aparece la grieta en relación al espesor.

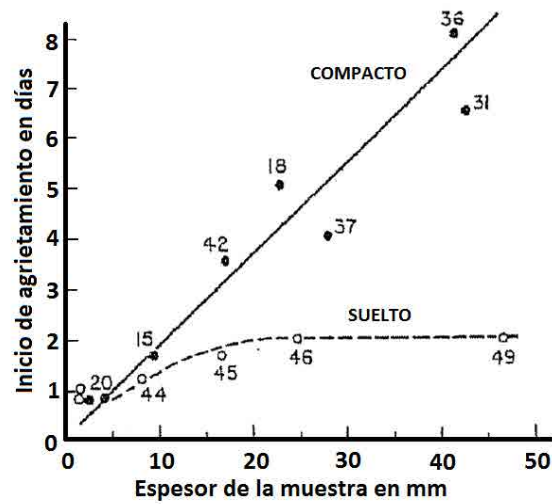
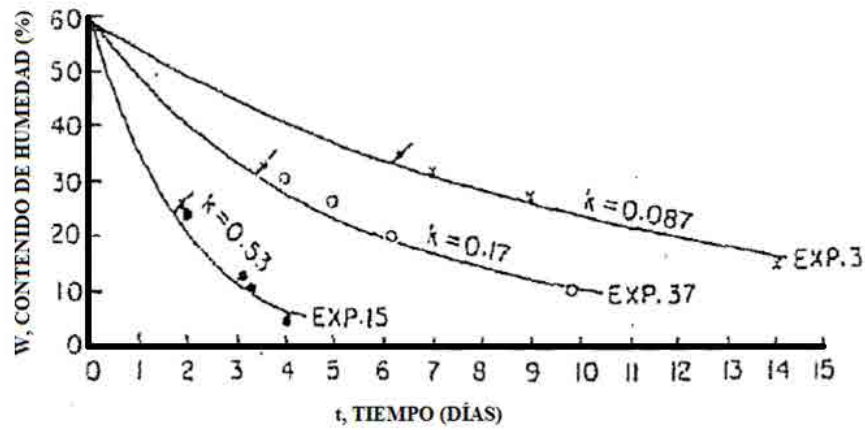
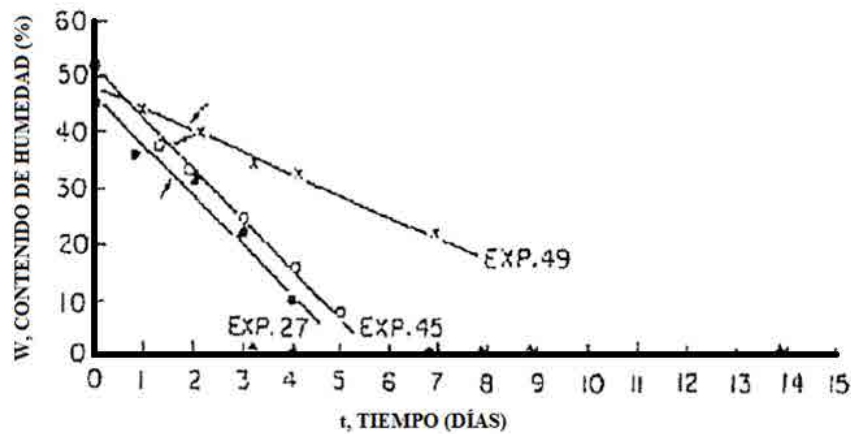


Figura 2.2 - Relación entre tiempo necesario para la primera grieta y espesor de la muestra (Corte & Higashi, 1960)



(a) COMPACTO



(b) SUELTO

Figura 2.3 - Evolución del contenido de humedad. a) Suelo Compacto; b) Suelo Suelto. (Corte & Higashi, 1960)

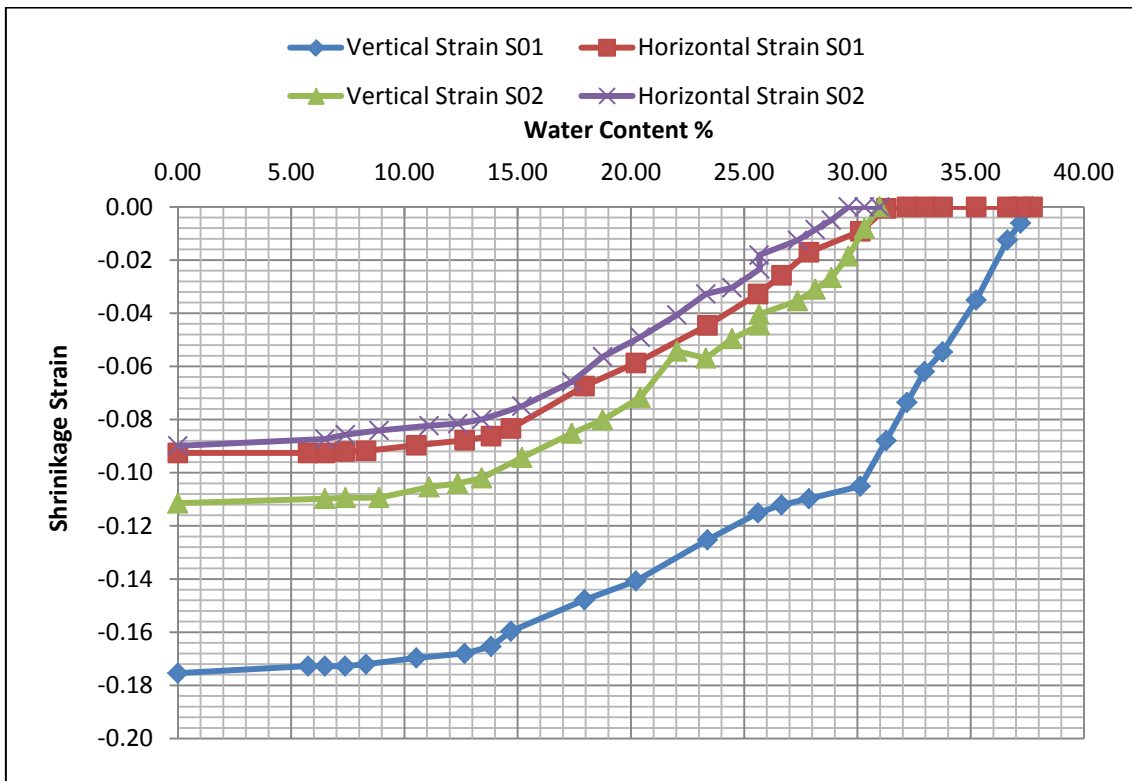


Figura 2.4 - Contenido de agua versus deformación por retracción para el suelo “Indian Head Till”. Test S01, contenido de agua inicial 37,7%, Test S02, contenido de agua inicial 31% (Lau, 1987).

La evolución del contenido de humedad durante la desecación es la que se presenta en la Figura 2.3. Como puede verse los resultados son diferentes si el suelo está más o menos compactado.

Se muestran a continuación algunos de los resultados de Lau (1987). En cuanto a la retracción, puede verse en la Figura 2.4 y Figura 2.5 los resultados de los ensayos de retracción en muestras circulares. En todos los casos la deformación vertical es mayor que la horizontal. Se observa además que la “arcilla de Regina” presenta mayor deformación en general y tiene un límite líquido considerablemente mayor que el suelo “Indian Head Till” lo cual le permite albergar un contenido de agua inicial considerablemente mayor. En cuanto a la retracción y agrietamiento, los ensayos se realizaron para estudiar la influencia del tipo de suelo, el contenido de agua inicial, el espesor de la muestra y las condiciones de adherencia con el contenedor del suelo.

En la Figura 2.6 se observan los resultados de los ensayos T01 a T06 de (Lau, 1987) en cuanto a la relación entre la deformación vertical y el tiempo de ensayo. Se muestra además el valor de la deformación vertical cuando se producen la primer grieta visible con lo cual se puede establecer el tiempo de dicho acontecimiento.

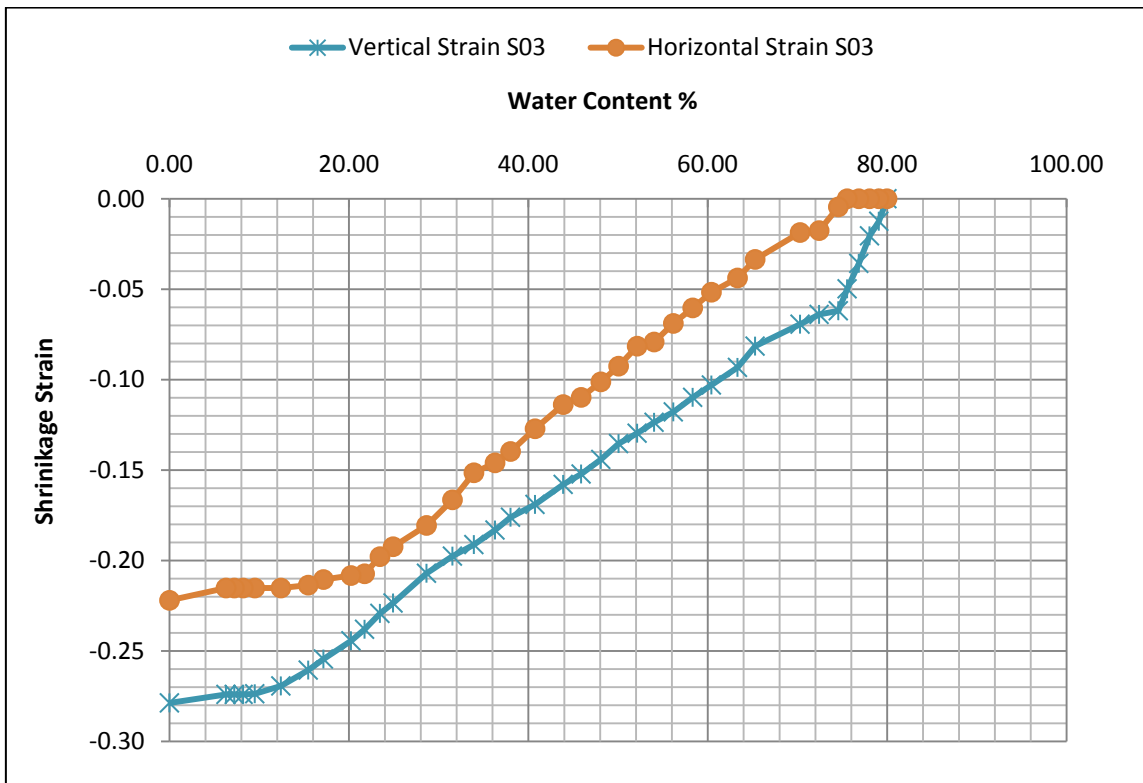


Figura 2.5 - Contenido de agua versus deformación por retracción para el suelo “Regina Clay”. Test S03, contenido de agua inicial 80% (Lau, 1987).

Se hicieron dos ensayos de desecación en muestras de suelo circulares de 10 mm y 40 mm de altura, la primera presentó agrietamiento abundante y la segunda no presentó agrietamiento. Esto conllevó a la conclusión de que *el espesor de la muestra tiene influencia* en el patrón de agrietamiento. Los ensayos T05 y T06 fueron sometidos a las mismas condiciones de desecación pero se trataron de suelos distintos y se observó que el suelo arcilloso presentó más grietas y a menor distancia entre unas de otras, indicando que *el tipo de suelo tiene influencia* en el patrón de agrietamiento.

En general las grietas se produjeron con valores de succión de entre 0 y 87 kPa, para valores mayores de succión no se formaron nuevas grietas, y las grietas se ensacharon a medida que la succión se fue incrementando. La muestra T03 que se preparó con menos agua inicial 3.5% por debajo del límite líquido y por cuyo motivo presentaba burbujas de aire en su interior requirió menos tiempo para agrietarse y lo hizo para valores de succión relativamente bajos de 1.8 kPa. Por otro lado, el ensayo T06 con retracción no restringida requirió más tiempo para agrietarse y necesitó valores de succión de 11.9 kPa.

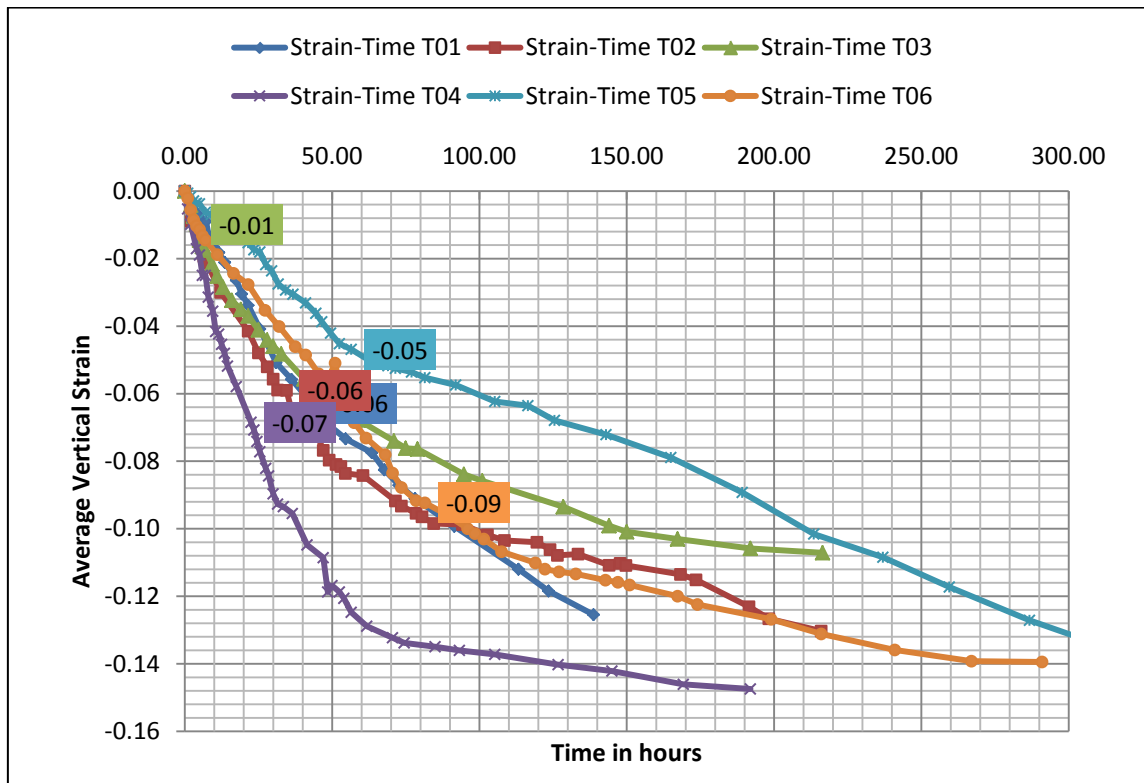


Figura 2.6 - Tiempo en horas versus deformación vertical promedio (Lau, 1987).

Muestras que mostraron más defectos como la T03 necesitaron menos tiempo para agrietarse. El test T04 que fue de menor espesor, presentó valores más altos de succión que se justifican según los autores por la adhesión con el fondo del recipiente que hace variar las condiciones de tensiones en la masa de suelo. En los ensayos T05 y T06 en arcilla de Regina e Indian Head Till los valores de succión fueron de 5.9 kPa y 11.9 kPa respectivamente al momento del agrietamiento, se supone que en condiciones de campo donde sí hay restricciones, los valores de succión necesarios para producir agrietamiento serán mayores.

2.3.5.2. Arqueo (Curling)

Un fenómeno relacionado con las grietas por desecación es el arqueado (curling) del suelo durante desecación. Se trata de una deformación característica de algunas arcillas sometidas a secado que adoptan una forma de arco. Es de esperar que este fenómeno se produzca dejando las muestras con una deformación cóncava con sus extremos hacia arriba, puesto que este es el resultado usual en el campo y en muchos ensayos de laboratorio (Ver Capítulo 1 Introducción). Sin embargo, en estos ensayos ocurre una deformación convexa Figura 2.7b. En el artículo de Nahlawi & Kodikara (2002), se establece la variación del módulo a succión de la arcilla en estudio y se mide la tasa de secado en la superficie superior e inferior de la muestra.

La retracción se produce en tres etapas, la primera retracción sin arqueo, la segunda un ligero arqueo de los extremos hacia arriba (cóncavo) y finalmente un arqueo de la zona media de la muestra (convexo) hasta alcanzar el aspecto final que se ve en Figura 2.7b.

Se ha medido el contenido de humedad durante el ensayo y se han obtenido las curvas de desecación que se muestran en la Figura 2.8.

En dicha figura se observa que al principio de los ensayos la tasa de secado fue mayor en la superficie de arriba, ya que la humedad medida en esa zona w_t resulta menor que la medida en la zona inferior w_l . Las mediciones de humedad se han hecho en la mitad superior e inferior de las muestras, lo cual fue complicado debido a su pequeño tamaño. De hecho parte de las curvas son inferidas debido a la imposibilidad de tomar muestras y distinguirlas según su posición. En la Figura 2.8a se indica que el arqueo ha comenzado cuando la humedad está a valores cercanos al límite de retracción del 22% y es cuando se produce un cambio en la velocidad de secado entre las caras superior e inferior de la muestra. Los autores justifican el comportamiento de la arcilla basándose en las mediciones hechas en el laboratorio y explicando que al inicio hay mayor retracción en la cara superior que produce el arqueo cóncavo debido a que se seca más deprisa. Posteriormente, la arcilla se seca más por debajo induciendo mayor retracción en la cara inferior lo cual produce finalmente el arqueo convexo.

Más adelante, en este Estado del Arte se presentan los resultados de simulaciones hechas de estos ensayos (Kodikara, et al., 2004). En el capítulo de Simulaciones se presenta un análisis detallado de los ensayos y simulaciones hechas con el modelo propuesto implementado en el entorno MATLAB.

2.3.5.3. Influencia de las Condiciones de Contorno de las Bandejas

En su tesis doctoral, Ávila (2004), estudia entre otras cuestiones la influencia de las condiciones de contorno que imponen las bandejas que contienen al suelo durante el proceso de desecación.

Las pruebas que aquí se describen se consideran dentro de una escala intermedia de observación. En particular se analizan las características del inicio y la evolución de las grietas producidas por desecación en relación con las condiciones iniciales del ensayo (humedad, succión y grado de saturación), con la geometría de los moldes empleados y con la tasa de desecación. Se hace énfasis especial en el análisis de las restricciones a la retracción impuestas por los distintos moldes de ensayo y se discute cómo tales condiciones de restricción influyen de manera muy importante en las características del agrietamiento.

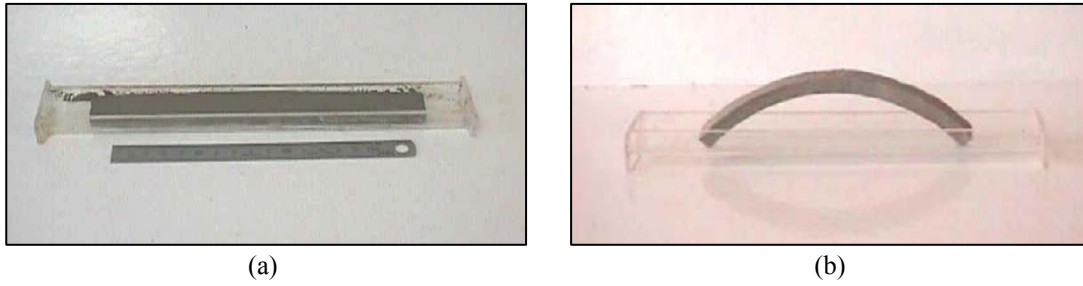


Figura 2.7 – Ensayo de desecación sin restricción: a) *Retracción inicial*; b) *Arqueo final a las 65.5 horas de la arcilla de Werribee* (Nahlawi & Kodikara, 2002).

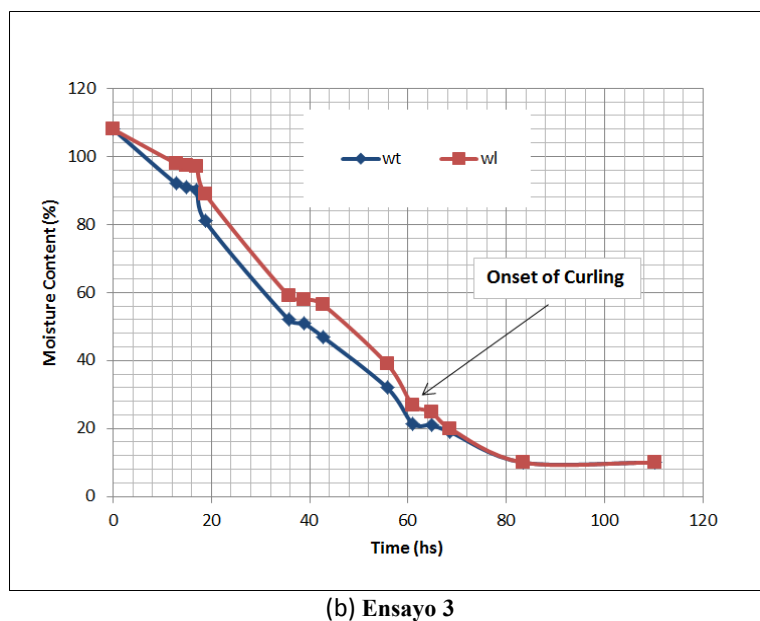
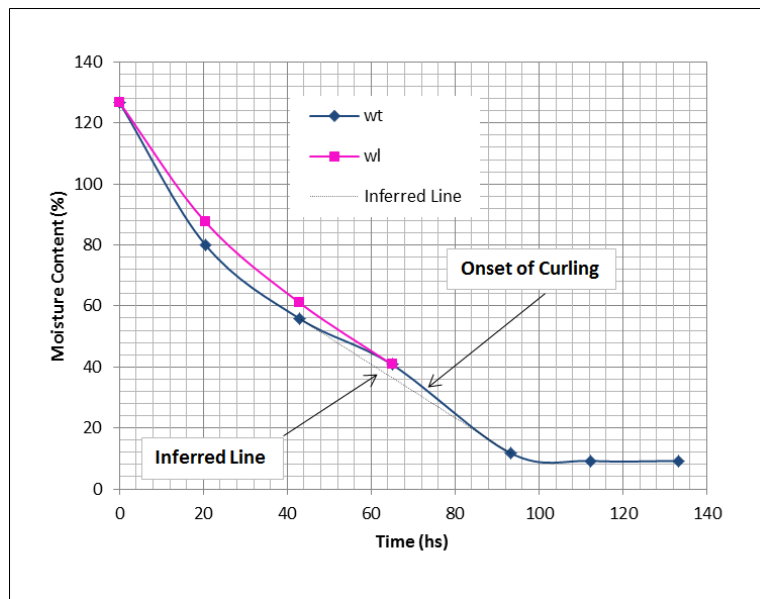


Figura 2.8 - Curvas de secado de ensayos 1a y 3b. w_t es la humedad en la superficie superior de la muestra, w_l es la humedad en la superficie inferior de la muestra. Nahlawi & Kodikara (2002)

Los ensayos consistieron en someter a desecación muestras reconstituidas de arcilla colocadas en tres tipos de moldes diferentes. Por las características de los moldes se generan agrietamientos en la muestra cuando se alcanzan determinados valores de humedad o de succión, estos agrietamientos van incrementándose a medida que avanza la desecación, hasta que finalmente llegan a una condición estable.

Se realizaron varias series de ensayos, con diferentes valores de humedad inicial.

La forma de los moldes, la interpretación de las tensiones que producen las grietas y las grietas primarias, secundarias y terciarias que se producen se presentan en la Figura 2.9.

La retracción inicial favorece la concentración de tensiones de tracción entre las zonas 1-2 y 2-3 Figura 2.9a, formando grieta primarias (primarias por ser las primeras en producirse). Una vez el suelo queda separado en tres porciones rectangulares, se puede dividir en dos partes generando grietas secundarias. Luego cada porción puede subdividirse nuevamente mediante la aparición de grietas terciarias. Las grietas secundarias y terciarias no siempre se producen debido a que hay otros factores que condicionan el agrietamiento además de las restricciones.

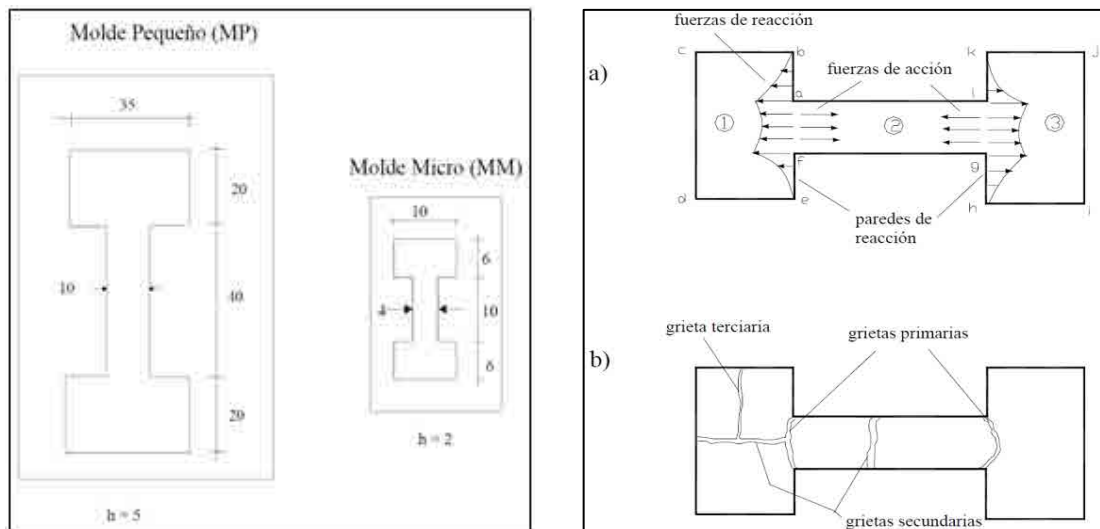


Figura 2.9 – Ensayos de desecación en muestras con forma de doble T. **Izquierda:** Forma de los moldes para ensayos de desecación en Moldes Pequeño y Micro. **Derecha:** a) Fuerzas que provocan el agrietamiento por desecación; b) Grietas primarias, secundarias y terciarias. (Ávila, 2004).

2.3.5.4. Estudio de Muestras Delgadas

La idea de los ensayos realizados por Nahlawi & Kodikara (2006) fue obtener grietas perpendiculares a la longitud mayor de las muestras, lo cual se consiguió fabricando muestras con longitudes considerablemente mayores que el ancho y el alto, además de lubricar los contornos de los moldes para obtener solo restricciones en la base del molde. Se intentó categorizar a las grietas según el tiempo en que se producen pero con un criterio que a veces complica distinguir grietas secundarias de terciarias. El criterio consiste en considerar grietas primarias a aquellas que se producen en primer lugar, excluyendo a cualquier grieta entre dos primarias. Secundarias son aquellas que se producen en segunda instancia entre dos primarias. Grietas terciarias son las que se producen en tercera instancia entre dos secundarias o entre una primaria y una secundaria.

En la Figura 2.10 se observa el patrón final de agrietamiento para la muestra del test 3 de Nahlawi & Kodikara (2006). En la Figura 2.11 se presenta un esquema de todo el proceso de agrietamiento para la muestra del test 4. Se presentan distintas etapas con la aparición de grietas primarias, secundarias y terciarias.

Se hizo un recuento del número de grietas y celdas, así como también del espaciado medio y el espesor final de las muestras.

Se presentaron curvas de desecación que relacionan el contenido de agua con el tiempo de ensayo. De los resultados presentados se desprende que el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio (de todos fluidos) varía entre 29 y 272 horas, dependiendo del espesor de la muestra y de las condiciones climáticas locales de desecación. Lo mismo ocurre para la arcilla compacta, cuyo equilibrio se alcanzó entre 49 y 182.5 horas de desecación. En estos ensayos se vio que la humedad en la superficie de arriba w_t fue menor que la medida en la base de la muestra w_l durante la mayor parte del ensayo. Sin embargo, luego de transcurrido un tiempo las diferencias disminuyen y el perfil de humedad se vuelve uniforme. También se notó un efecto ligero de curling en las celdas de suelo que se curvaron en su zona media hacia arriba.

En su trabajo, Peron, et al. (2009), obtiene luego de 17 horas de desecación, grietas transversales a la longitud mayor de las muestras. El número de grietas varió entre 6 y 8 con predominio de 7 grietas por muestra. Algunas veces las grietas comenzaron desde arriba y a veces desde abajo. Ejemplos de patrones finales de agrietamiento se pueden ver en la Figura 2.12. Estos ensayos presentan resultados similares a los de Nahlawi & Kodikara (2006).

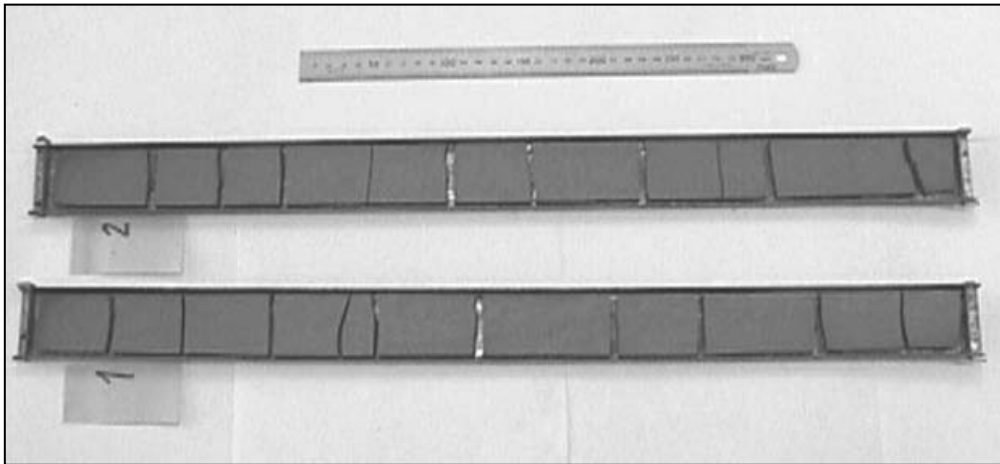


Figura 2.10 - Patrón de agrietamiento final de la arcilla de Werribee del test 3 (*tiempo de desecación 147.75 horas*). (Nahlawi & Kodikara, 2006).

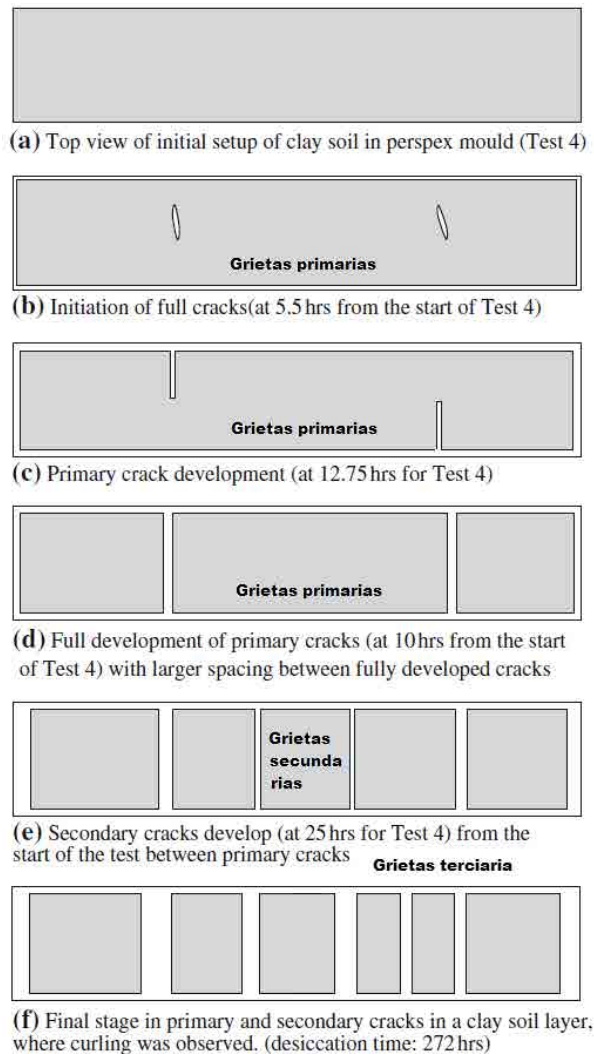


Figura 2.11 – Ensayo de agrietamiento N° 4 de la arcilla de Werribee (Nahlawi & Kodikara, 2006).

2.3.5.5. Ensayos sin Restricción

Lubricando las bandejas, Peron, et al. (2009), presenta ensayos de muestras alargadas como en la de la Figura 2.12. En la Figura 2.13a se observa la evolución del contenido de humedad con el tiempo, la cual es lineal hasta el minuto 2000. En la Figura 2.13b se muestra el perfil de humedad con el tiempo para el ensayo sobre la muestra F5. Dicha Figura evidencia que la desecación es más pronunciada en los extremos de la muestra hasta que al final del proceso se estabiliza.

Ninguna de las muestras para ensayos sin restricción experimentó agrietamiento. La parte central de las muestras mostraron menos deformación axial que en los extremos. En la Figura 2.14a se observa la evolución de la deformación axial en el centro y total respecto del contenido de agua del ensayo FC. También se observa en la Figura 2.14b la evolución de la relación de vacíos y de la deformación promedio (vertical, transversal y axial) de los ensayos de retracción sin restricción F5, F6, F7 y F9. Se ha visto mucha variabilidad en las deformaciones debido a que la muestra pierde su forma de paralelepípedo durante el ensayo por efecto de arqueado. En la misma figura se observa que la deformación vertical es mayor que la horizontal, tanto axial como longitudinal, y que la relación de vacíos varía linealmente respecto del contenido gravimétrico de agua hasta un valor de 20%. La misma tendencia que presentó Lau (1987) en su trabajo.

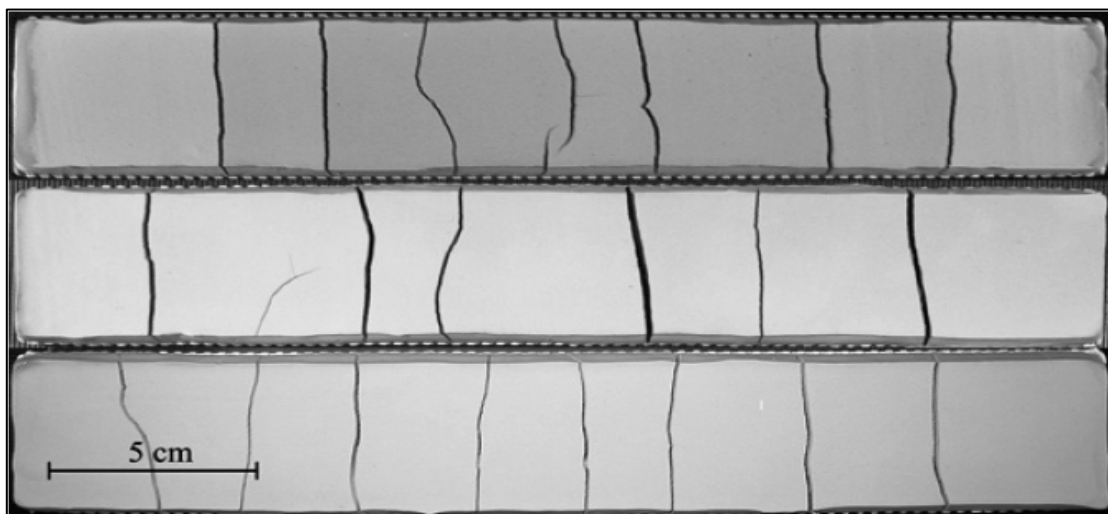


Figura 2.12 - Ejemplo de patrón final de agrietamiento (Peron, et al., 2009).

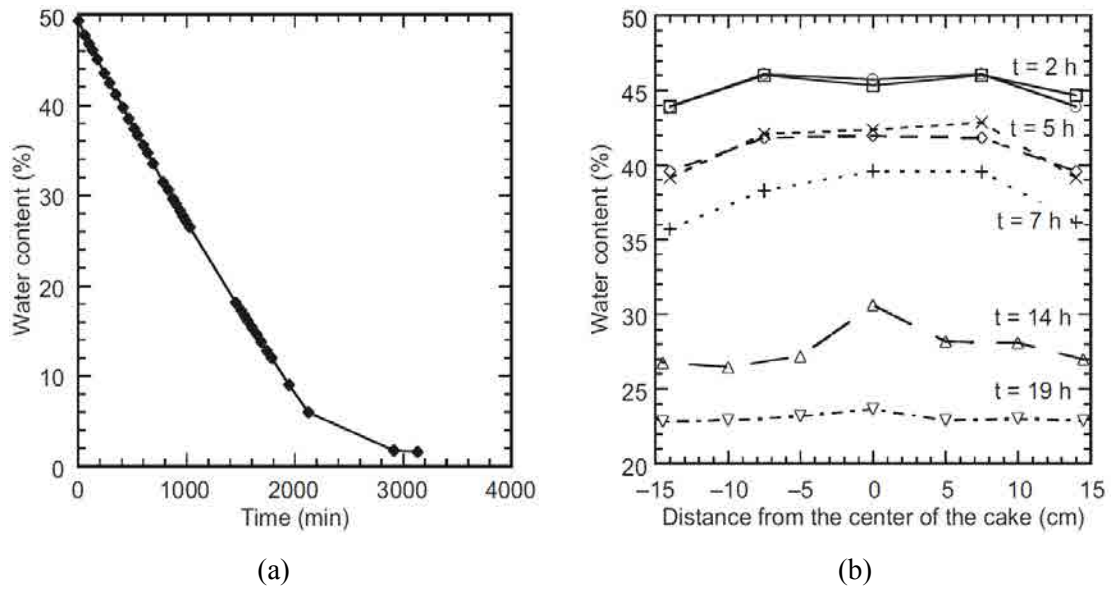


Figura 2.13 – Resultados de experimentos en laboratorio de la desecación en muestras sin restricción. *a)* Evolución del contenido gravimétrico de agua con el tiempo; *b)* Distribución del contenido de agua durante ensayo de desecación. (Peron, et al., 2009).

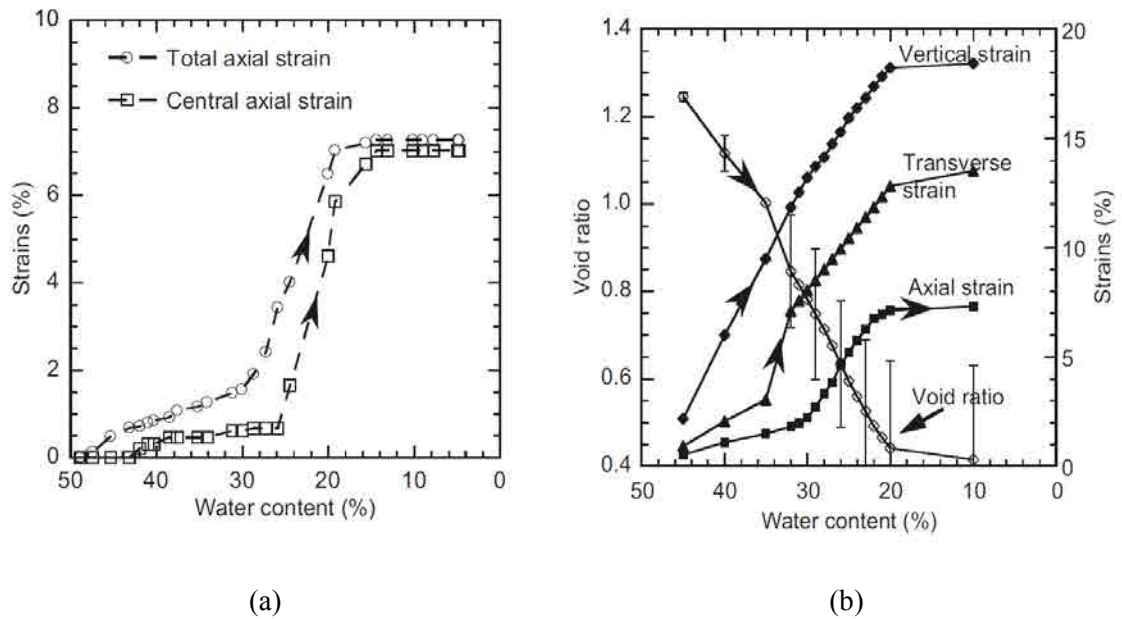


Figura 2.14 - Resultados de experimentos en laboratorio de la desecación en muestras sin restricción. *a)* Evolución de la deformación con el contenido gravimétrico de agua, ensayo FC; *b)* Evolución de la relación de vacíos y la deformación con el contenido de agua (valores medios de los ensayos F5, F6, F7 y F9). (Peron, et al., 2009).

En la Figura 2.15, se presentan las curvas de retención de los tres suelos utilizados en los ensayos. Los ensayos de desecación sin restricción para estos materiales permiten establecer dos etapas diferenciadas. La mayor parte de la deformación se produce, en la primera etapa, antes de

alcanzar el valor de entrada de aire y con un grado de saturación cercano al 100% (en línea con lo propuesto por Terzaghi en 1927 y Casagrande en 1938) y dicha deformación es permanente (Fleureau, et al., 1993) y (Peron, et al., 2007). La segunda etapa se produce con disminución del grado de saturación y con una tasa de deformación mucho menor. Conceptualmente la desecación sin restricción sería: (i) la presión de vapor alrededor de la muestra decrece y produce evaporación del líquido en el suelo que escapa por los contornos, (ii) el gradiente negativo de presión de poros entre la superficie y el interior de la muestra induce el flujo de agua. Debido a que la presión de agua decrece, aumenta la tensión efectiva y la matriz experimenta compresión con la consiguiente retracción. La primera etapa mencionada más arriba, puede considerarse como una consolidación elasto-plástica vía un incremento de la tensión efectiva.

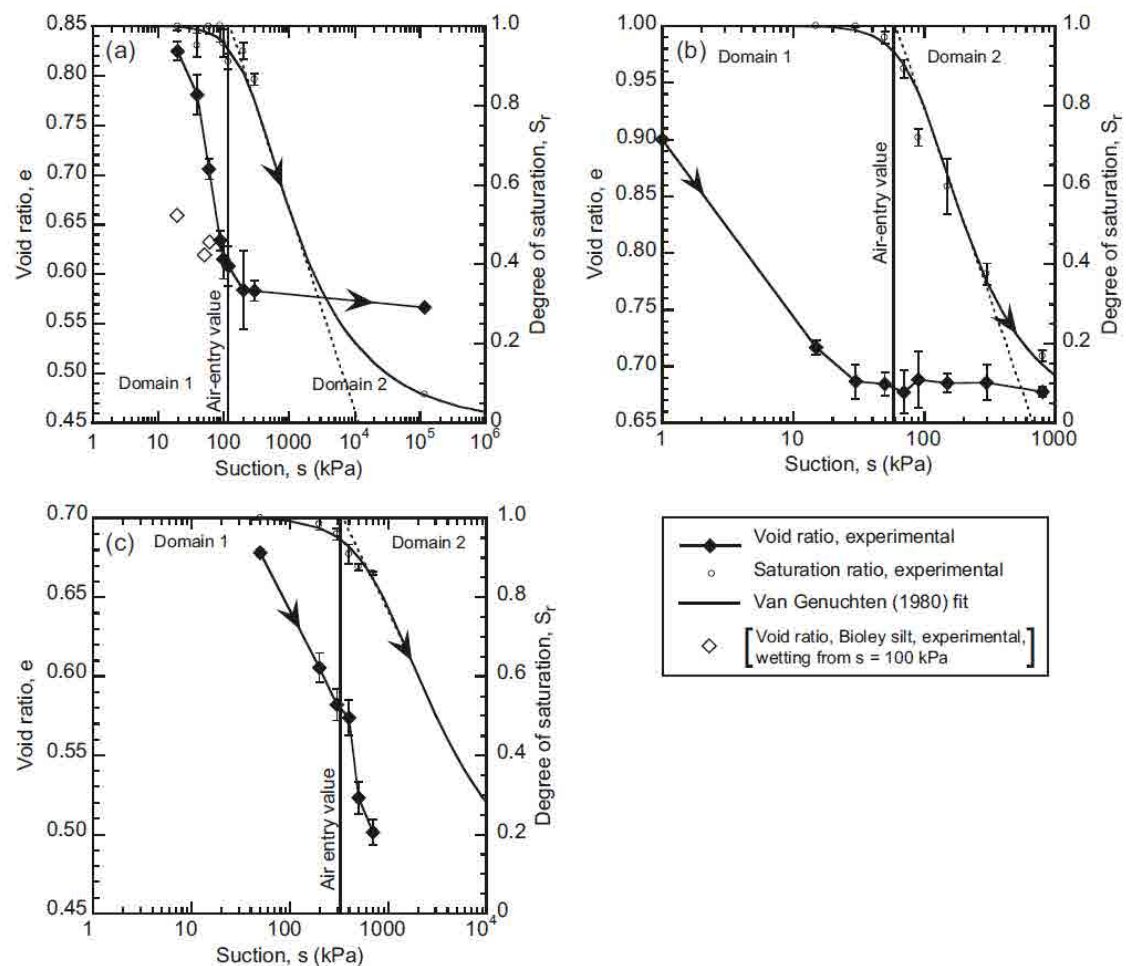


Figura 2.15 - Curvas de retención: a) *Biolet Silt*, b) *Sion Silt*, and c) *La Frasse Clay*. (Peron, et al., 2009).

2.3.5.6. Influencia del Espesor de las Muestras

Desde el inicio de la investigación en desecación y agrietamiento (Corte & Higashi, 1960), se ha detectado la influencia que tiene el espesor de la muestra en el patrón de agrietamiento. Repetidamente se ha comprobado este hecho. En la Figura 2.16 se presenta el resultado obtenido por (Lakshmikantha, 2009) en algunos de sus ensayos. Para cada una de las 5 bandejas presentadas se observa la influencia en el agrietamiento cuando el espesor de la muestra varía de 10 a 20 mm. Queda claro que a menor espesor la distancia entre grietas disminuye.

2.3.5.7. Evolución de Desecación en Muestras Circulares de gran Tamaño

En ensayos de desecación de muestras circulares y también en las bandejas rectangulares, ha quedado evidencia de que el fenómeno de agrietamiento tiene un carácter tridimensional. Las grietas pueden aparecer tanto en la superficie como por debajo de las muestras de suelo y su propagación no solo se da en dirección vertical.

La construcción de una cámara ambiental ha permitido medir las principales variables que gobiernan el problema de desecación. En la Figura 2.17, (Lakshmikantha, 2009) presenta la evolución de la humedad relativa del ambiente y la temperatura de la cámara y la succión en el suelo con el tiempo. Hasta unos 100 kPa la relación entre la succión y el tiempo es aproximadamente lineal en escala semi-logarítmica. Al final de los ensayos se han obtenido valores de succión del orden de 100 MPa y que tienen tendencia asintótica en un diagrama succión-tiempo en escala semi-logarítmica.

2.3.5.8. Resistencia a Tracción

La resistencia a tracción es un parámetro fundamental para analizar la fractura en el suelo. La variabilidad de dicha propiedad ha sido analizada por varios autores tales como (Baker, 1981; Morris, et al., 1992; Snyder & Miller, 1985; Towner, 1987a; Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995; Ayad, et al., 1997; Farrel, et al., 1967; Towner, 1987b; Tang & Graham, 2000). En la tesis de Ávila (2004), se han hecho ensayos de compresión unidimensional en cámara triaxial para reproducir trayectorias de tensiones previas a la rotura por tracción. También llevó a cabo ensayos de tracción con carga controlada y ensayos de tracción con deformación controlada para establecer dicha resistencia.

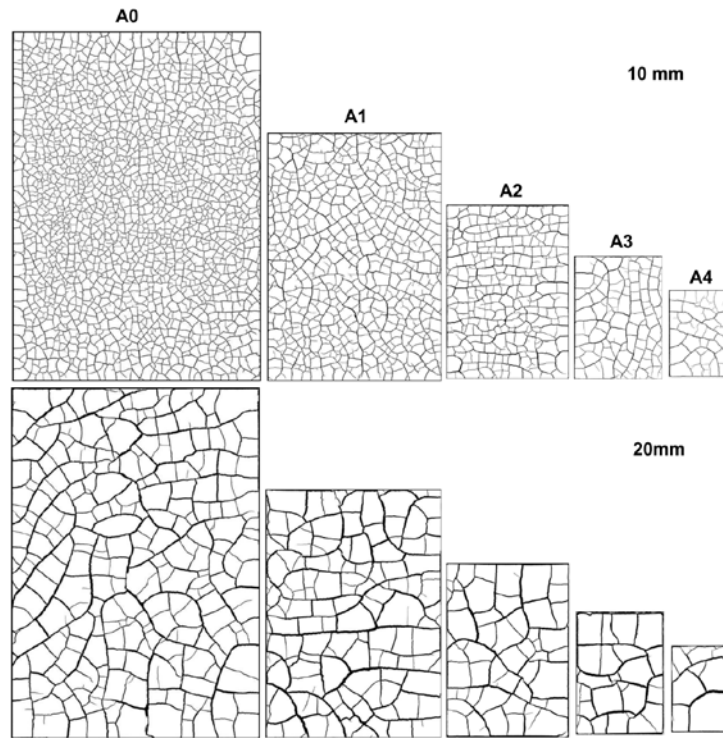


Figura 2.16 - Patrón final de grietas de especímenes rectangulares. (Lakshmikantha, 2009)

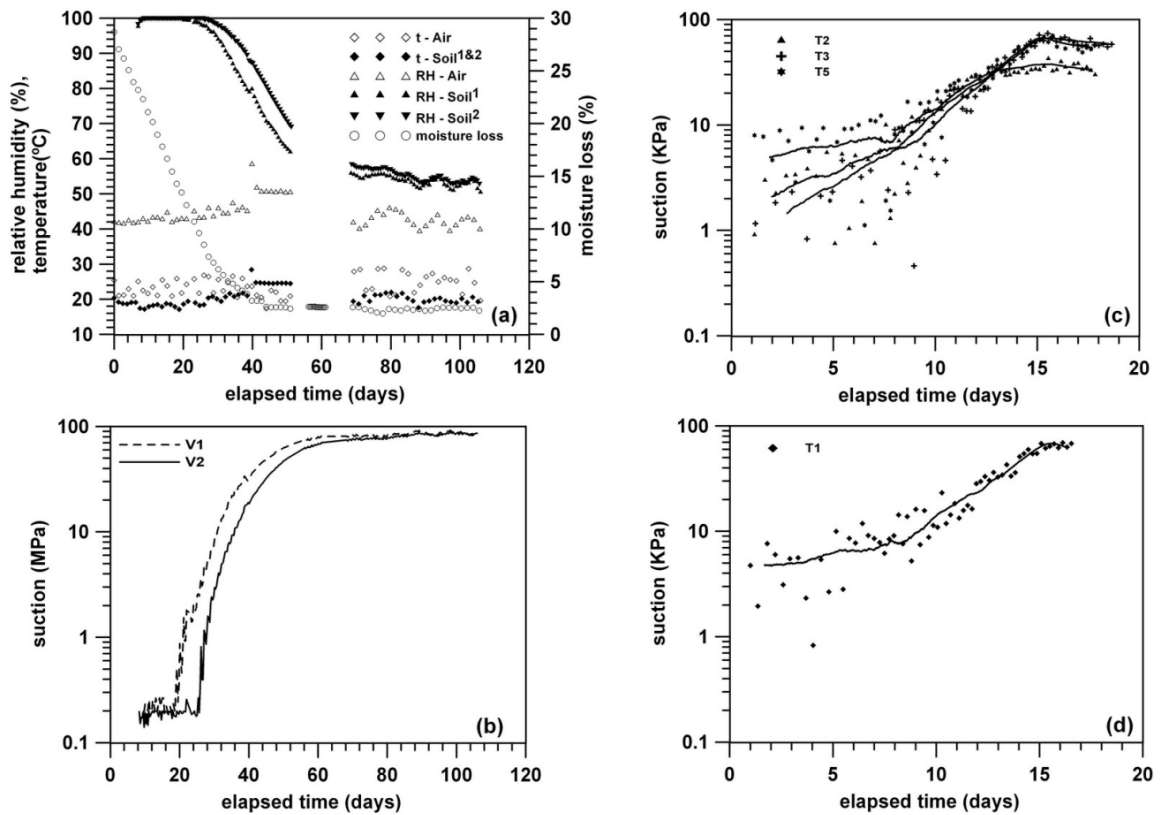


Figura 2.17 - Evolución de varios parámetros con el tiempo. *Muestra circular de 40 cm de diámetro x10 cm de altura bajo condiciones abiertas de laboratorio.* (Lakshmikantha, 2009)

En tesis anteriores de carácter experimental (Lakshmikantha, 2009), se han realizado ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a tracción del suelo mediante ensayos directos e indirectos y la tenacidad a fractura teniendo en cuenta la influencia del contenido de humedad variable del suelo durante los procesos de desecación. Esto es importante porque es sabido que estas propiedades varían con el grado de saturación así como también con la densidad del suelo.

Como puede verse en la Figura 2.18, (Lakshmikantha, 2009), existe una relación entre el contenido de humedad y la resistencia a tracción. Esta relación induce a variaciones de resistencia con la succión o presión de poros en la masa de suelo. Esta relación es del tipo parabólica y presenta un pico.

2.3.5.9. Materiales Distintos a la Arcilla y Clasificación de Patrones de Agrietamiento

En su trabajo, Costa, et al. (2013), concluye que según el material los resultados de desecación fueron bastante distintos. Además de suelo, utilizó almidón de patata en ensayos de desecación. Las arcillas presentaron un patrón de grietas ortogonales, secuenciales parecidos a lo reportado por otros autores Corte & Higashi (1960) y Muller (1998). La arcilla “Merri Creek” mostró las primeras grietas en el contacto con los recipientes en general y después unas grietas primarias que dividieron a la muestra en celdas que presentaron luego grietas secundarias. Aunque la clasificación no puede ser absoluta las arcillas presentaron en general grietas secuenciales y ortogonales.

El efecto del espesor de los especímenes ha sido estudiado anteriormente (Corte & Higashi, 1960), (Lakshmikantha, et al., 2006) y se acepta que especímenes delgados presentan un mayor número de grietas con celdas de menor tamaño, mientras que especímenes más gruesos presentan grietas más anchas. En la Figura 2.19a, se muestran los resultados obtenidos por Costa, respecto de la influencia del espesor de las muestras. Usando técnicas de análisis de imagen se ven los resultados de la relación entre el área promedio de las celdas resultantes y el espesor de la muestra (Figura 2.19b). Claramente el área de las celdas crece con el espesor de las muestras.

El almidón de patata presentó agrietamiento simultáneo y con patrón no ortogonal. La superficie de 30 mm de espesor presentó una costra delgada y quemada que ocultaba las grietas. Todos los especímenes se agrietaron en corto tiempo y simultáneamente hasta el fondo.

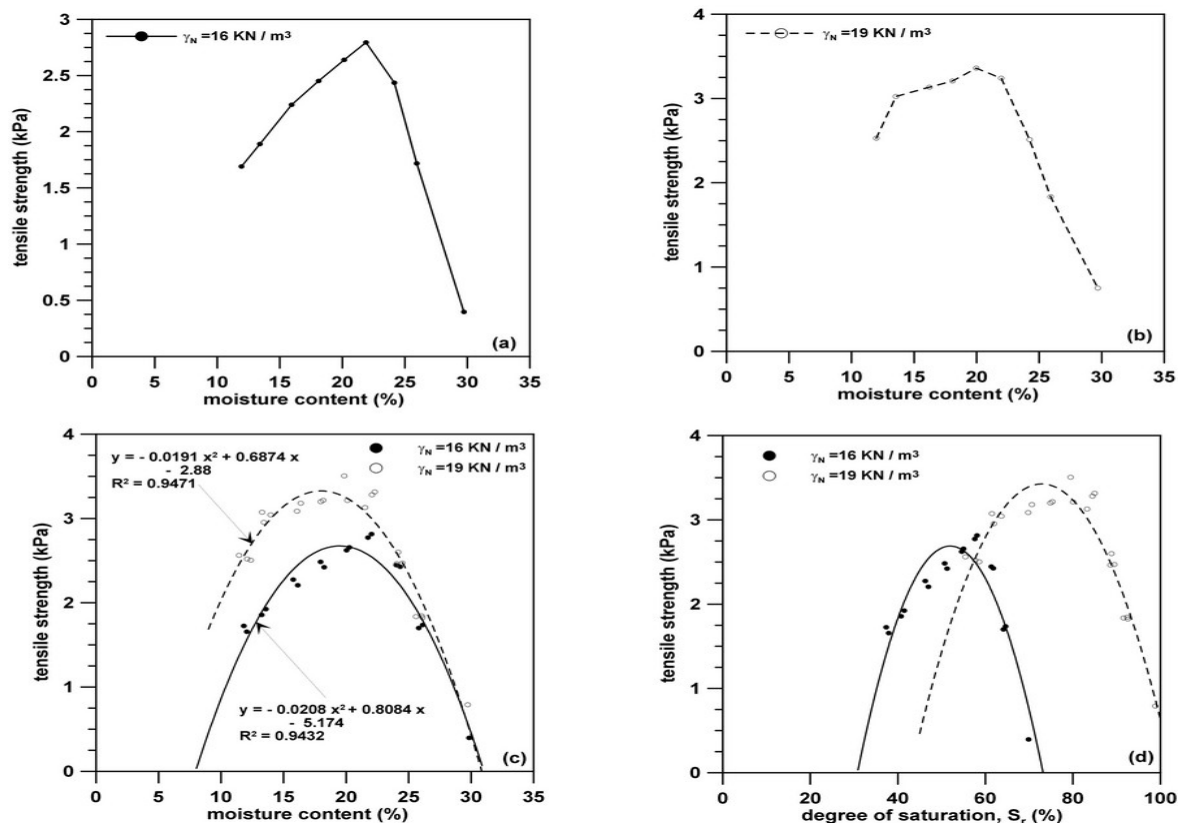


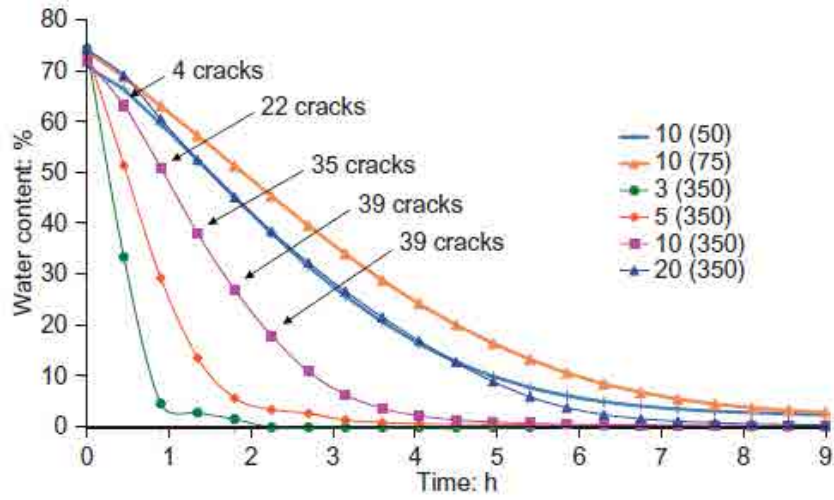
Figura 2.18 - Relación entre el contenido de humedad y la resistencia a tracción. (Lakshmikantha, 2009).

Este material ha podido reproducir los patrones de grietas presentados por (Muller, 1998) y (Toramaru & Matsumoto, 2004) en juntas verticales de lava enfriada. En los patrones prevalece la geometría hexagonal. La diferencia fundamental entre la arcilla y el almidón de patata es la uniformidad de tamaños de grano que presenta el almidón. Por ello se estudió una arena con distribución de granos similar al almidón pero no se obtuvieron grietas.

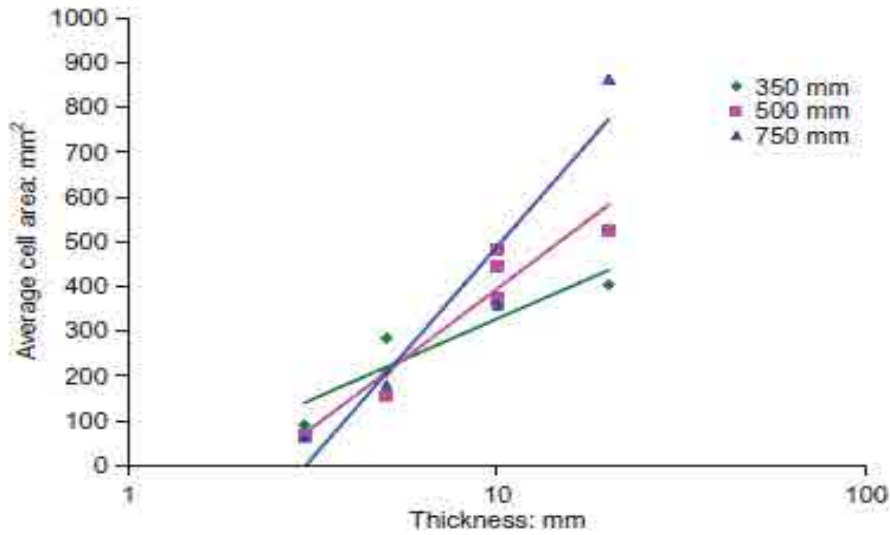
2.3.6. Resultados de los Ensayos en el Campo

Un estudio de desecación y agrietamiento en el campo que puede considerarse como referencia es el trabajo de Konrad & Ayad (1997a).

Una excavación con tres niveles (Figura 2.20, *izquierda*) fue expuesta a evaporación continua durante 35 días para observar y documentar la formación de las grietas de retracción en una arcilla marina intacta (*en el fondo de la excavación, intact clay*), en una sometida a la intemperie (*segundo nivel, weathered clay*) y tierra vegetal (*en la superficie expuesta al ambiente, top soil*).



(a)



(b)

Figura 2.19 – Efecto del espesor de los especímenes: a) Variación del contenido de humedad con el tiempo para distintos espesores (3, 5, 10 y 20 mm); b) Área promedio de las celdas vs. Espesor de la muestra, distancia de las lámparas (50, 75, 350, 500 y 750 mm) (Costa, et al., 2013)

La desecación de la arcilla intacta de Saint-Alban bajo condiciones controladas, con un índice medio de la evaporación de 0.018 cm/h (18 mm/h) y un contenido de agua inicial de 103%, produjo fisuras primarias visibles después de 17 h con un espaciamiento medio de 20 a 24 centímetros. Las grietas secundarias dentro de cada polígono original aparecieron después de cerca de 70 h de evaporación. Las grietas horizontales a una profundidad de 6 a 8 centímetros también fueron creadas debido a las tensiones diferenciales inducidas por la retracción

diferencial de los polígonos del suelo. La evaporación adicional dio lugar a la formación de un nuevo sistema de grietas verticales después de cerca de 150 h de evaporación en el suelo debajo del plano de grietas horizontales de corte. El cambio de volumen inducido por la retracción se asoció a estos diversos sistemas de polígonos produciendo grietas con una protuberancia en su parte inferior que indicaba que la profundidad de la propagación de grieta debajo del plano de grietas horizontales de corte era cerca de 3 a 4 centímetros. En la arcilla expuesta a la intemperie con un contenido de agua inicial de cerca de 50%, el espaciamiento medio fue de 10 a 12 centímetros, indicando que el espaciamiento entre las grietas primarias está relacionado con el tipo del suelo. En la tierra vegetal (*top soil*) con poca cohesión, no se observó grieta alguna.

2.3.6.1. Descripción de la Formación y Propagación de Grietas

De la experiencia se observa que la fisuras comienzan en la superficie del terreno formando un sistema de polígonos más o menos regulares. Primeramente aparecen un sistema de grietas principales y luego un sistema de grietas secundarias.

El proceso de formación de grietas en la arcilla intacta (*Intact Clay*) se resume esquemáticamente en seis etapas (Figura 2.20, Derecha):

“Etapas 1: en esta fase se producen lo que denominamos grietas primarias de una profundidad de unos 5 cm. y un espaciamiento de unos 20 o 24 cm., a las 17 horas de iniciada la evaporación.

Etapas 2: Aumenta la apertura de las fisuras principales por retracción de los polígonos de suelo.

Etapas 3: A las 70 horas de iniciada la evaporación se producen grietas secundarias cuya profundidad dependerán de las características del suelo.

Etapas 4: A unos 6 a 8 centímetros se producen grietas horizontales debido a efectos tridimensionales con una longitud de unos 3 o 4 centímetros, es decir, de un tercio del tamaño de los polígonos de suelo.

Etapas 5: Aparecen un nuevo sistema de grietas verticales a partir del plano horizontal de grietas anteriores.

Etapas 6: A partir del último sistema de grietas mencionadas se producen otras que generan una protuberancia bajo los polígonos cuyo tamaño ronda los 4 a 6 centímetros”.

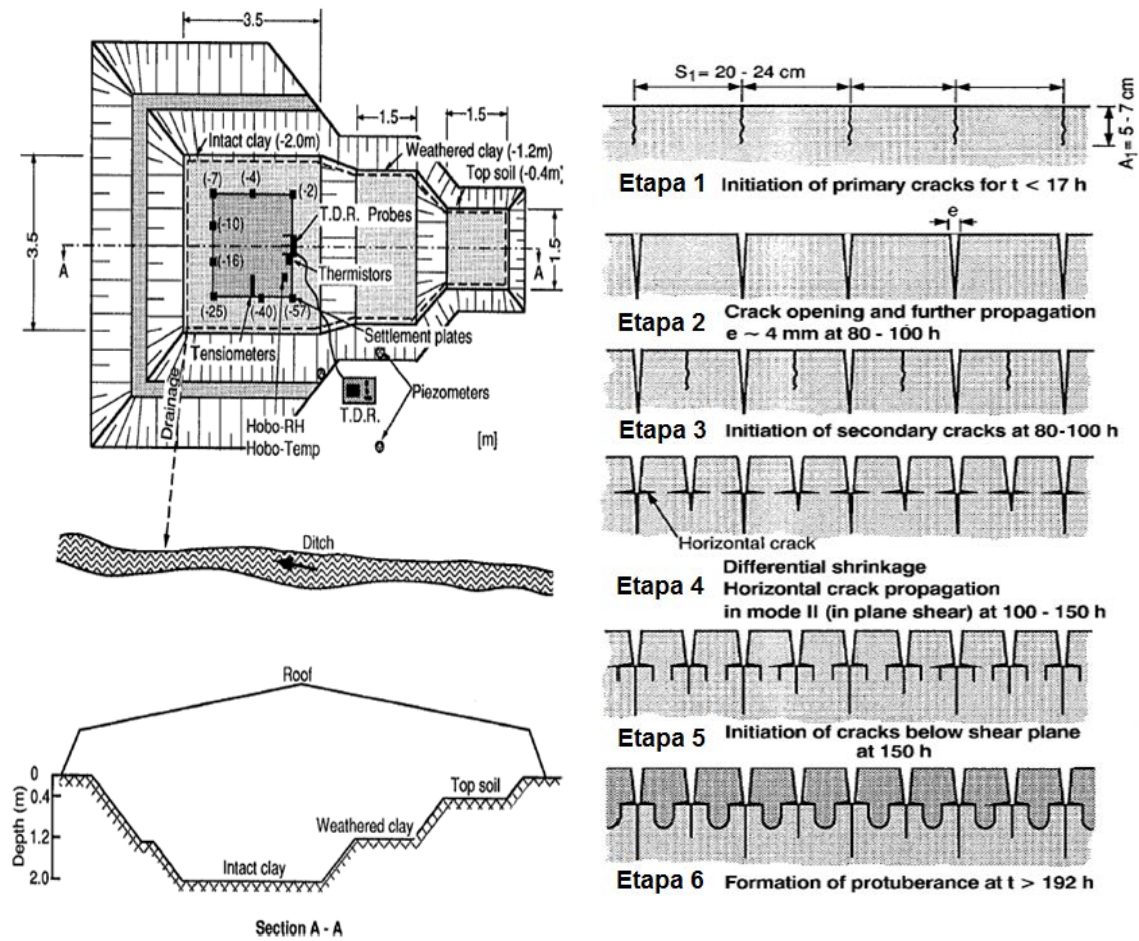


Figura 2.20 – Ensayo de desecación en el campo: **Izquierda:** Forma de la excavación para el ensayo de campo. **Derecha:** Etapas de formación de grietas por desecación (Konrad & Ayad, 1997a)

2.4. Vertiente Teórica

En esta sección se presenta una revisión de varios artículos de revista que estudian el problema teórico desde ángulos diferentes. Se recorre en el tiempo desde las primeras teorías basadas en soluciones analíticas de la elasticidad y fractura (Lachenbruch, 1961), (Morris, et al., 1992), hasta la combinación del estudio de flujo en medio poroso y la MFLE (Konrad & Ayad, 1997b). En el último apartado se distingue el enfoque probabilista del enfoque determinista con los cuales se puede estudiar el fenómeno de agrietamiento en suelos.

2.4.1. Medio Elástico y Mecánica de Fractura Lineal Elástica

El trabajo de Lachenbruch (1961) está escrito pensando en las grietas producidas en basaltos, permafrost, barro y grietas en glaciares que son ejemplos de fenómenos geológicos que pueden ser estudiados mediante modelos teóricos de tensiones en un espacio semi-infinito.

Un modelo elástico de tensiones está asociado siempre a cargas instantáneas. A pesar de que las tensiones que producen grietas se desarrollan lentamente, se puede utilizar con suficiente aproximación un modelo elástico para predecir la redistribución de tensiones a lo largo de la grieta. Para estudiar el proceso de formación de grietas es necesario tener a disposición un modelo matemático que permita obtener la redistribución de tensiones en el instante posterior a la formación de la misma. Un modelo elástico de la perturbación de tensiones causada por el agrietamiento debe dar una aproximación del estado de tensiones existente inmediatamente después que la grieta se ha formado.

En este artículo se presenta una solución a la redistribución de tensiones cuando en un medio infinito o semi-infinito aparece una grieta, siendo que las tensiones al inicio están dadas en un caso por una función constante y en otro una función lineal en función de la profundidad. Con esta formulación se han obtenido gráficos y tablas que permiten calcular la redistribución de tensiones en las proximidades de la grieta para los dos casos mencionados. El efecto de la grieta que aparece en el suelo es de relajar las tensiones en el suelo que rodea la grieta y este campo de tensiones relajadas está relacionado con el espaciamiento de las mismas.

La disipación de energía en el extremo de la grieta en cambio tiene que ver con su propagación en profundidad. En el modelo de fractura proporcionado por la teoría de Griffith (1921) modificado por Irwin (1957) y por Orowan (1948), según lo referido por Lachenbruch (1961) en este artículo, la energía superficial considerada por Griffith (1921) es substituida por la energía de la deformación plástica cerca de la extremidad de la grieta que avanza.

Por ejemplo, en un suelo saturado, sin cargas exteriores y suponiendo que el nivel freático coincide con la superficie del terreno y que esta es a su vez horizontal, la distribución de tensiones debida al peso propio del suelo y al peso del agua es un diagrama de presiones triangular. La grieta se inicia cuando por desecación el nivel freático comienza a descender. La grieta se forma generalmente en la superficie donde hay mayores tensiones de tracción y se propaga hacia el interior del medio donde la tensión disminuye y pasa en última instancia a ser de compresión. La profundidad y el espaciamiento de esas grietas son las cantidades mensurables que nos dan información sobre las condiciones mecánicas bajo las cuales las grietas se formaron, es decir, nos dan información acerca del estado de tensiones en la masa de suelo y por lo tanto sobre la historia del medio en el cual ocurren.

En definitiva en el artículo se plantea en una primera parte la resolución de la redistribución de tensiones debido a la aparición de grietas en el medio a través de un modelo matemático de elasticidad y posteriormente se estudia mediante la teoría de fractura de Griffith (1921) modificada la distribución de las grietas, es decir, su profundidad y su separación.

En el trabajo de Morris, et al. (1992) se derivan expresiones de tensión horizontal mediante tres métodos (Teoría de la Elasticidad, MFLE y análisis de rotura basado en la transición entre rotura a tracción y rotura por corte) y se igualan a la resistencia a tracción del suelo. El suelo se considera parcialmente saturado y el análisis se hace teniendo en cuenta las formulaciones de Fredlund & Morgenstern (1977) y Fredlund (1979). A partir de estas expresiones se deduce la profundidad de agrietamiento.

2.4.1.1. Formulación Basada en la Teoría de la Elasticidad

El artículo de Morris, et al. (1992) presenta tres expresiones de la profundidad de la grieta, z_c , haciendo las siguientes consideraciones:

- a) Succión y resistencia a tracción son constantes

$$z_c = As_0 + Bt \quad (2.1)$$

Dónde: $A = (1 - 2\nu)/\nu\gamma$ y $B = (1 - \nu)/\nu\gamma$; t es la resistencia a tracción y s_0 es el valor constante de succión. ν y γ son el coeficiente de Poisson y el peso específico del suelo.

- b) Succión lineal se reduce en profundidad y resistencia a tracción constante

$$z_c = \frac{s_0 + Ct}{\frac{s_0}{W} + D} \quad (2.2)$$

Dónde: $C = (1 - \nu)/(1 - 2\nu)$ y $D = \nu\gamma/(1 - 2\nu)$

- c) Succión variable y resistencia a tracción variable en función de la succión matricial en la punta de la grieta

$$z_c = \frac{s_0}{\frac{s_0}{W} + E} \quad (2.3)$$

Dónde: $E = \frac{\nu\gamma}{1-2\nu-(1-\nu)\alpha_T \tan \phi^b \cot \phi'}$; ϕ^b y ϕ' son ángulos de la superficie de falla por corte; $\alpha_T = 0.5 \tan \phi'$.

Se comparan la resistencia a tracción del suelo y la tensión horizontal actuante que es función de del módulo de elasticidad E y el módulo de elasticidad debido a succión H . La succión por otra parte depende del nivel freático.

2.4.1.2. Formulación Basada en la MFLE

En este caso se comparan el factor de intensidad de tensiones K_I y el factor de intensidad de tensiones crítico K_{IC} . El factor de intensidad de tensiones se calcula con la tensión horizontal actuante (variable con la profundidad) y el segundo, que es una propiedad del material, se calcula a partir de la energía de superficie que son valores típicos reportados para suelos.

Para modo I de fractura, la tensión horizontal en la dirección perpendicular a la grieta es

$$\sigma_x = (2\pi r)^{0.5} K_I \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2.4)$$

Donde r es la distancia desde la punta de la grieta y con una inclinación θ respecto del eje de la grieta, y K_I es el factor de intensidad de tensiones para el modo I.

El factor de intensidad de tensiones crítico puede calcularse mediante:

$$K_{IC} = \frac{-2\xi E}{1 - \nu^2} \quad (2.5)$$

Donde E es el módulo de elasticidad de Young, ν es el módulo de Poisson y ξ es la energía superficial específica del suelo. Lee & Ingles (1968) sugieren que ξ varía entre 0.1 y 1.0 J/m².

Se han calculado los valores de z_c para $E = 5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 18 - 20 \text{ kN/m}^3$, $s_0 = 5-100 \text{ kPa}$, $W = 0.5-10 \text{ m}$, y $\xi = 0.1 - 1 \text{ J/m}^2$. Los resultados típicos se muestran en la Figura 2.21 para $s = s_0(1 - \frac{z_c}{W})$; $\nu = 0.3$; $E = 5 \text{ MPa}$; $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ (arriba del nivel freático) y $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$ (debajo del nivel freático).

2.4.1.3. Formulación Basada en la Resistencia al Corte

Nuevamente en este caso se presentan tres análisis:

- El primer caso está basado en los planteamientos de Bagge (1985) que considera que el agrietamiento es un mecanismo que se produce entre una falla a tracción y en corte. Es decir, existe un punto de transición donde la falla pasa a ser de tracción a corte. En un plano $(p-u_a) - q$ como se muestra en la Figura 2.22, la línea AB es el límite de rotura en tracción y la línea BC es el límite de rotura por corte. El punto B es el punto de transición y corresponde a un estado donde la tensión vertical es lo suficientemente grande como para evitar que ocurra una rotura por tracción. Así, la línea BD con pendiente $-3/2$ representa la tensión vertical efectiva a la profundidad máxima de agrietamiento o profundidad crítica z_c .

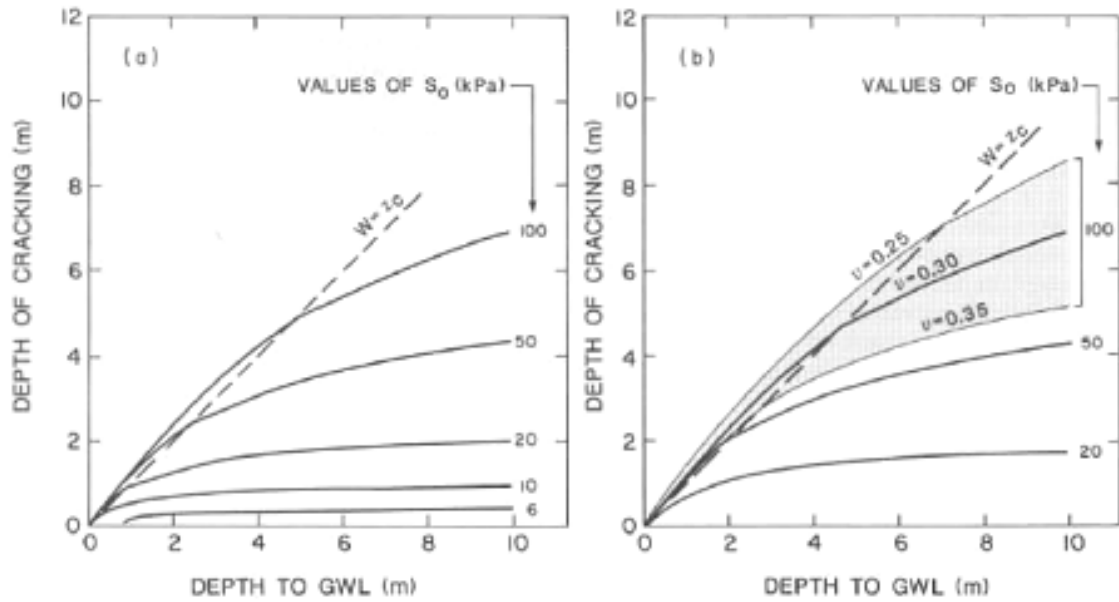


Figura 2.21 - Profundidad de grieta para MFLE. a) $\zeta = 0.1 \text{ J/m}^2$. b) $\zeta = 1.0 \text{ J/m}^2$. $S = S_0(1 - z_c)/W$; $v = 0.3$; $E = 5 \text{ MPa}$; $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$. (Morris, et al., 1992)

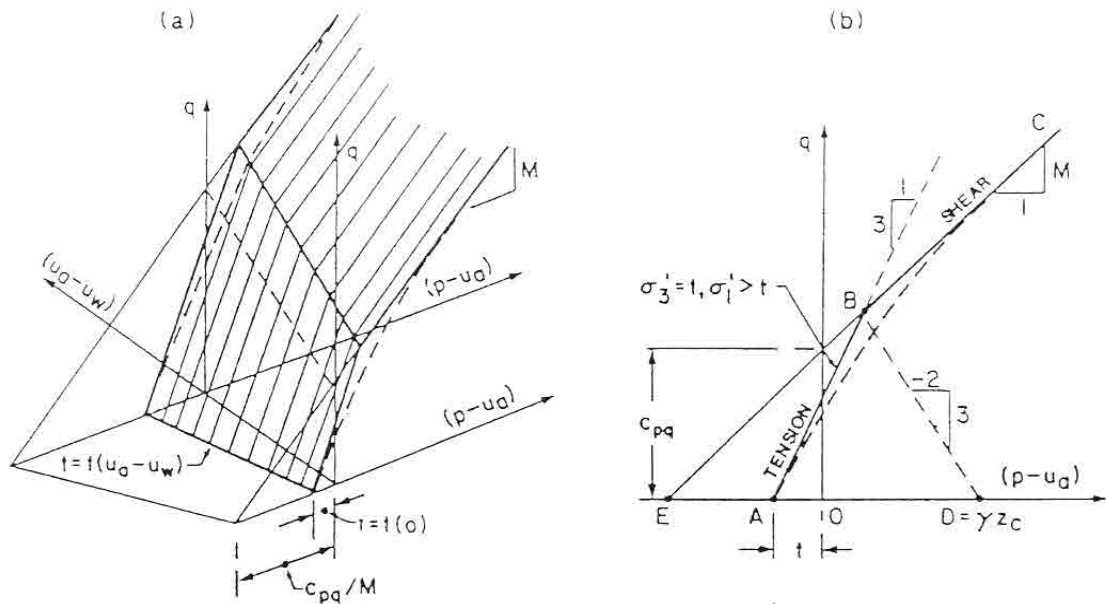


Figura 2.22 - Envolvente de falla a tracción, mostrando el efecto de la succión sobre la resistencia a tracción. (Morris, et al., 1992).

Conocida la resistencia a tracción σ_t y a la envolvente de rotura por corte, se pueden localizar los puntos B y D y a partir de D, se calcula la profundidad critica ya que $D = \gamma z_c$, donde γ es el peso específico del suelo.

Para $t = -0.5c_{\tau\sigma}$ (Baker, 1981) constante la expresión de la profundidad de grieta es:

$$z_c = \frac{S_0 + \frac{3+2M}{3F}t}{\frac{S_0}{W} + \frac{3-M}{3F}\gamma} \quad (2.6)$$

Donde:

$$F = \frac{6\cos\phi'\tan\phi^b}{3 - \sin\phi'} \quad (2.7)$$

M es la pendiente de la línea BC en la Figura 2.22, S_0 es el valor de la succión en la superficie, W es la profundidad freática, γ es el peso específico del suelo ϕ' y ϕ^b son parámetros de la superficie de falla por corte en el espacio $(u_a - u_w) - (\sigma - u_a) - \tau_f$ (succión - tensión neta - tensión de rotura por corte).

- b) El segundo caso considera que la resistencia a tracción no es constante y es función de la succión: $\sigma_t = -0.5(u_a - u_w)\tan\phi^b\cot\phi'$.

$$z_c = \frac{S_0}{\frac{S_0}{W} + G} \quad (2.8)$$

Donde

$$G = \frac{(3-M)\gamma}{\frac{18\cos\phi'\tan\phi^b}{3 - \sin\phi'} - (3+2M)\alpha_T\tan\phi^b\cot\phi'} \quad (2.9)$$

- c) El tercer caso se trata de un análisis tipo Rankine Figura 2.23. La rotura ocurre por corte cuando la tensión principal menor tiende a hacerse negativa (resistencia a tracción).

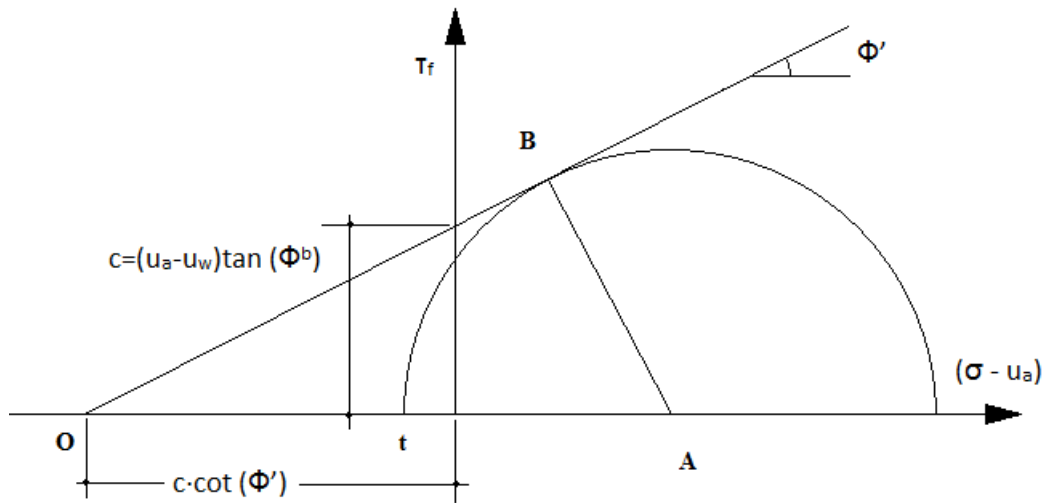


Figura 2.23 - Esquema de la condición de falla basada en la solución de Rankine. (Morris, et al., 1992).

$$z_c = \frac{S_0}{\frac{S_0}{W} + H} \quad (2.10)$$

Donde

$$H = \frac{\gamma(1 - \sin\phi')}{\tan\phi^b [2\cos\phi' - \alpha_T(1 + \sin\phi')\cot\phi']} \quad (2.11)$$

2.4.2. Flujo en Medio Poroso y MFLE

El trabajo de Konrad & Ayad (1997b) propone un marco de trabajo más sofisticado que el elástico, para simular este ensayo el ensayo de campo presentado en el apartado 2.3.6. Introduce la succión matricial como principal variable proponiendo un modelo unidimensional de evaporación. En este artículo se presta especial atención a los fenómenos de agrietamiento de suelos arcillosos debido a la reducción de humedad por evaporación en la superficie. Generalmente, el patrón de la grieta es poligonal, consistiendo principalmente en pentágonos y heptágonos, y el tamaño de estos polígonos es casi uniforme. Esta red de grietas de retracción es responsable del aumento de la conductividad hidráulica de la masa del suelo, que puede ser varias veces mayor que la del suelo intacto. La extensa investigación en el área de la MS ha establecido que la conductividad hidráulica global de cualquier medio fracturado depende fuertemente de la abertura de las grietas y del espaciamiento entre las mismas.

2.4.2.1. Características de la Retracción en Suelos Arcillosos

Cuando una arcilla saturada es sujeta a evaporación, experimenta una disminución continua del contenido en agua, presiones negativas o succiones se desarrollan en la red porosa del suelo. Si el suelo no presenta restricciones, las succiones desarrolladas imponen un aumento en tensiones efectivas, que produce una disminución del volumen del suelo por consolidación. La relación entre el contenido de agua y la relación de vacíos se utiliza a menudo como una característica de la retracción de un suelo dado. La Figura 2.24 presenta una curva típica de retracción para un suelo con un alto contenido de arcilla. Durante el proceso de secado, pueden ser identificadas tres etapas.

En la primera etapa, la disminución del volumen del suelo es igual a la pérdida de humedad y el suelo permanece saturado para una amplia gama de contenidos en agua.

La segunda etapa comienza cuando la tensión capilar alcanza la presión de entrada de aire a la red de capilares del suelo. Como el aire comienza a entrar en la red de capilares se va perdiendo humedad y la fase líquida se va haciendo cada vez más discontinua. En esta etapa la pérdida de humedad es mayor que la disminución del volumen y la curva de retracción se va haciendo horizontal.

En la tercera etapa llamada etapa de retracción nula, el suelo ya no presenta cambios volumétricos. La humedad perdida es entonces igual al incremento de volumen de aire.

En el caso de suelos cohesivos con alto contenido de arcilla la etapa de retracción inicial es importante comparada con las otras dos etapas. Así una gran parte de la retracción ocurre en condiciones saturadas (Bronswijk, 1988) y (Fleureau, et al., 1993).

2.4.2.2. Mecánica de Fractura y Propagación de Grietas

Los datos de campo (Konrad & Ayad, 1997a) confirman que los depósitos de arcilla sujetos a evaporación experimentan un proceso de retracción. Una vez que se inician las grietas en la superficie del suelo, la concentración de tensiones en la vecindad del extremo de la grieta da lugar a la propagación de esta a una profundidad controlada por el campo de tensiones y las características intrínsecas del suelo. Desde un punto de vista de la MF, la propagación de la grieta ocurre bajo **modo I** (*apertura*).

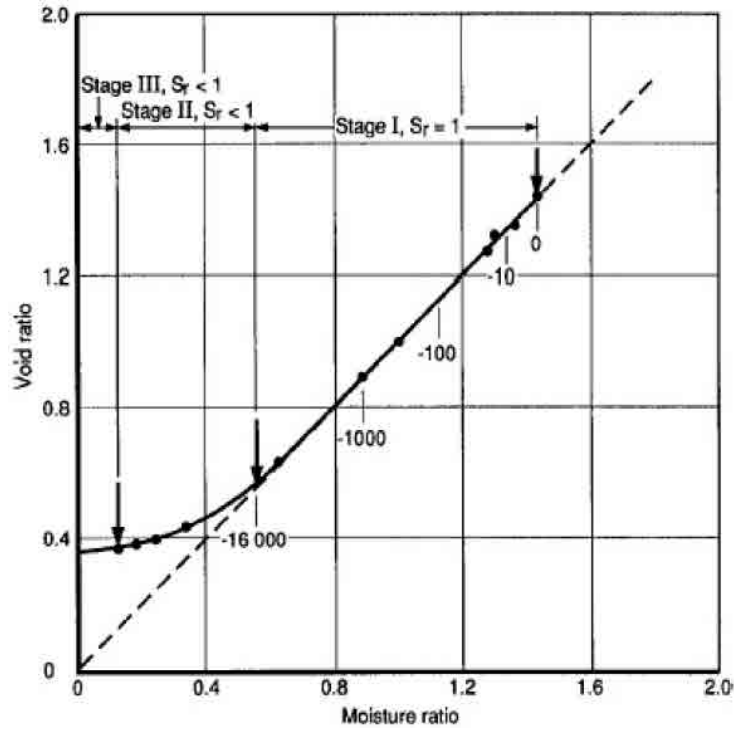


Figura 2.24 - Características típicas de retracción de suelos arcillosos (Bronswijk, 1988)

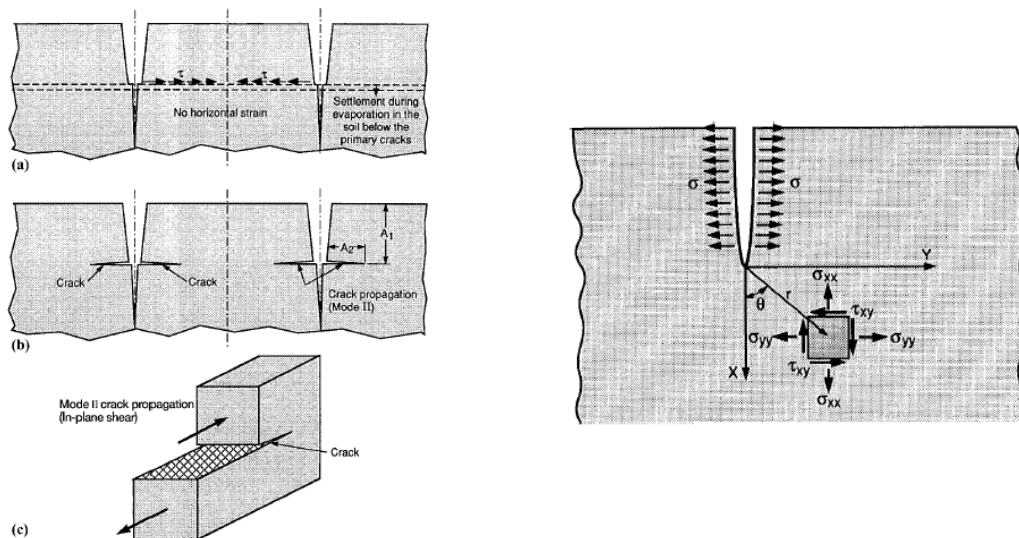


Figura 2.25 – Distintos modos de fractura: **Izquierda:** Descripción esquemática de la formación de planos de corte horizontales por desecación modo II (cizallamiento). **Derecha:** Tensiones en inmediaciones de la punta de la grieta en modo I (apertura). (Konrad & Ayad, 1997b)

La retracción diferencial debido a efectos tridimensionales unos pocos centímetros debajo de la superficie del suelo conducen a un mecanismo de propagación de la fractura en **modo II** (cizallamiento), Figura 2.25, izquierda, o un modo de fractura de corte, la grieta se propaga a lo largo de este plano. En este caso, el plano de corte es horizontal y la grieta es por lo tanto

horizontal también. La longitud de la propagación de grieta en **modo II** es controlada por la magnitud de la tensión de corte, que disminuye progresivamente mientras que la extremidad de la grieta se mueve hacia el centro del polígono debido al hecho de que la dislocación diferenciada en el centro del polígono es cero.

Mientras que la desecación irrestricta puede alcanzarse en muestras relativamente pequeñas de suelo en el laboratorio, los depósitos de campo de suelo cohesivo sujetos a evaporación experimentan un proceso restringido de desecación porque se mantiene una condición de deformación lateral neta cero hasta que una grieta se inicia en la superficie del suelo (Konrad & Ayad, 1997b, Figura 2.25, derecha).

La concentración de tensiones en el extremo de la grieta da lugar a su propagación a una profundidad controlada por el campo de tensiones y por las características intrínsecas del suelo.

En el trabajo de (Irwin, 1958) se ha demostrado que la propagación de la grieta está asociada esencialmente al campo de tensiones en la vecindad inmediata del extremo de la grieta..

Para una grieta larga de tensión en un medio idealmente elástico bajo condiciones planas de deformación, el factor de intensidad de tensiones para un modo de la fractura (modo I) se da como (en coordenadas cartesianas):

$$K_I = \left(\frac{EG}{1 - \nu^2} \right)^{0.5} \quad (2.12)$$

Dónde: E es el módulo de Young, G es la energía de fractura y ν es el módulo de Poisson.

Cuando K_I aumenta hasta un cierto valor crítico, K_{IC} , característico del material, la grieta comenzará la propagación sin aumento posterior en la tensión aplicada.

Para estimar la profundidad de propagación de la grieta en el momento que esta comienza, es necesario calcular el factor K_I de intensidad de tensiones como función de diversas longitudes de grietas y determinar el valor de la longitud A de la grieta para la cual K_I es igual a la resistencia (dureza) de fractura del suelo K_{IC} .

Para el caso de un sólido semi-infinito en el cual la tensión de tracción se distribuya uniformemente sobre una longitud "b" y esté bajo compresión gravitacional, Lachenbruch (1961) indica que la profundidad "a" influye de la siguiente manera:

$$K_{IW}(a) + K_{IG}(a) = K_{IC} \quad (2.13)$$

Donde $K_{IU}(a)$ representa la contribución de la tensión uniforme al factor de intensidad de tensiones de la grieta, y $K_{IG}(a)$ representa la contribución del peso de la columna de la altura "a".

Para la distribución rectangular de tensiones, cuando el cociente a/b es igual a 1, K_I es:

$$K_{IU} = 1.1\sigma\sqrt{a} \quad (2.14)$$

Donde σ es la tensión de tracción; y para la distribución triangular de la tensión inducida por la gravedad, el factor de la intensidad de la tensión será:

$$K_{IG} = -0.68\rho g\sqrt{a^3} \quad (2.15)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad y ρ es la densidad del suelo. El signo negativo indica que las tensiones son de compresión.

Según lo indicado por Arthur H. Lachenbruch (1961), la ecuación (2.13) será satisfecha por dos valores de la longitud "a" de la grieta según lo indicado esquemáticamente en la Figura 2.26. El valor más grande, $a = A$, corresponde a la última profundidad de una grieta que ha propagado en forma inestable. El valor más pequeño, $a = A_m$, representa la longitud inicial de la grieta necesaria para el inicio de la propagación inestable. Para una longitud de la grieta más pequeña que esa longitud crítica de grieta, A_m , el crecimiento de grieta es posible para cargas de tracción aumentadas, mientras que la propagación de grieta inestable (longitudes de grieta inicial entre A_m y A) es esencialmente espontánea.

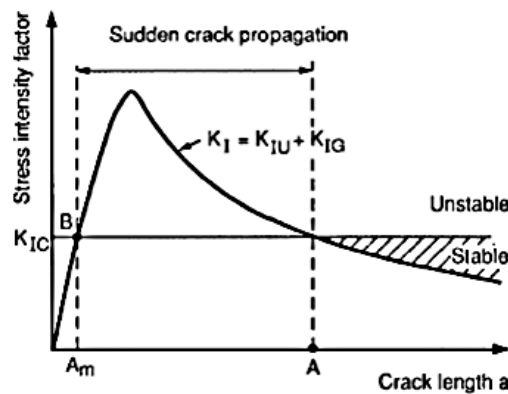


Figura 2.26 - Factor de intensidad de tensiones y propagación de grieta de acuerdo a la MFLE.

Seguidamente, se considera que la MFLE se aplica cuando la longitud de la grieta alcanza el punto B donde ocurre la propagación de grieta inestable. Bajo estas condiciones, la propagación de grieta a su última longitud, para una distribución dada de la tensión, es esencialmente "instantánea."

2.4.2.3. Descripción General del Modelo de Konrad & Ayad (1997)

La descripción general del modelo propuesto, ilustrado como diagrama de flujo en la Figura 2.27, revela que el enfoque utiliza tres modelos distintos que interactúan entre sí y asociados con el principio de tensiones efectivas para describir el campo de tensiones en el suelo: primero, un modelo unidimensional de flujo de masa (Richards, 1931) que permite determinar el perfil de succión en función del tiempo para un flujo superficial por evaporación dado proporciona los datos para determinar la condición de iniciación de la grieta usando las trayectorias de tensiones totales y efectivas durante la consolidación por desecación suponiendo condiciones restringidas; en segundo lugar, la teoría de MFLE permite la determinación de la última profundidad de una grieta bajo campo de tensión lateral dado (Morris, et al., 1992); y en tercer lugar, la teoría de la elasticidad lineal se utiliza para calcular la redistribución de la tensión alrededor de la grieta para determinar el grado de la zona de alivio de tensión, que, alternadamente, se relaciona directamente con el espaciamiento de estas grietas primarias (Lachenbruch, 1961). En la Figura 2.28 se observan las tres etapas del proceso que se resuelven con los tres modelos presentados.

La relación entre la tensión total y la presión de poro depende de la trayectoria de tensiones efectivas seguida durante la desecación. Obviamente, la trayectoria de tensiones efectivas, depende de la historia de tensiones del depósito de suelo según lo discutido abajo.

Una grieta se produce en la superficie del terreno cuando la tensión horizontal total supera la resistencia a tracción del terreno: σ_t . En la iniciación de la grieta, la presión negativa de poro que actuaba en un elemento del suelo adyacente a la superficie ha alcanzado así un valor crítico llamado ψ_{cr} .

Después de la iniciación de la grieta en la superficie del suelo, la profundidad de propagación de la grieta A, ver Figura 2.28d, para las condiciones totales existentes de tensión gobernadas por el perfil real de succión y la trayectoria de tensiones efectivas durante la desecación se evalúa usando el criterio de MF (modo I). Así, la evolución de K_I con respecto a diversas longitudes de la grieta se debe calcular para la distribución real de las tensiones de tracción totales que actúan en ambas caras de la grieta y compararlas con K_{IC} .

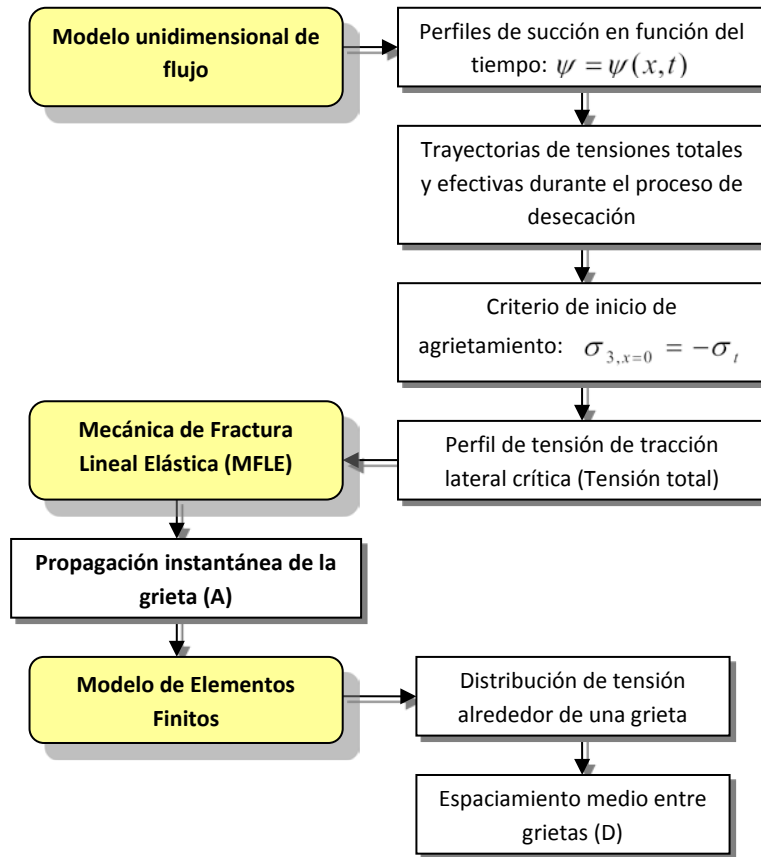


Figura 2.27 - Diagrama de flujo del modelo propuesto. (Konrad & Ayad, 1997b). *Problema de flujo 1D (Richard)*, *problema de Fractura* (Morris, et al., 1992) y *Redistribución de tensiones en medio elástico* (Lachenbruch, 1961)

Finalmente, una vez que se calcule la última profundidad de la grieta, el espaciamiento medio entre las grietas primarias, D, ver Figura 2.28d, se determina mediante el concepto de tensión ficticia (Lachenbruch, 1961) usando una simulación por elementos finitos en estado plano elástico lineal de tensiones.

2.4.2.4. Predicción del Perfil de Succiones Durante el Inicio de la Grieta

Los perfiles de succión en un suelo arcilloso sujeto a un flujo de agua unidimensional debido a una tasa de evaporación en la superficie, se obtiene resolviendo numéricamente la ecuación diferencial de flujo de agua transitoria, siguiente:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] - \frac{\partial k}{\partial x} \quad (2.16)$$

Donde $C(\psi)$ es el coeficiente de almacenamiento específico, y puede obtenerse de la curva de retención del suelo ($\psi - \theta$) y k es la conductividad hidráulica del suelo.

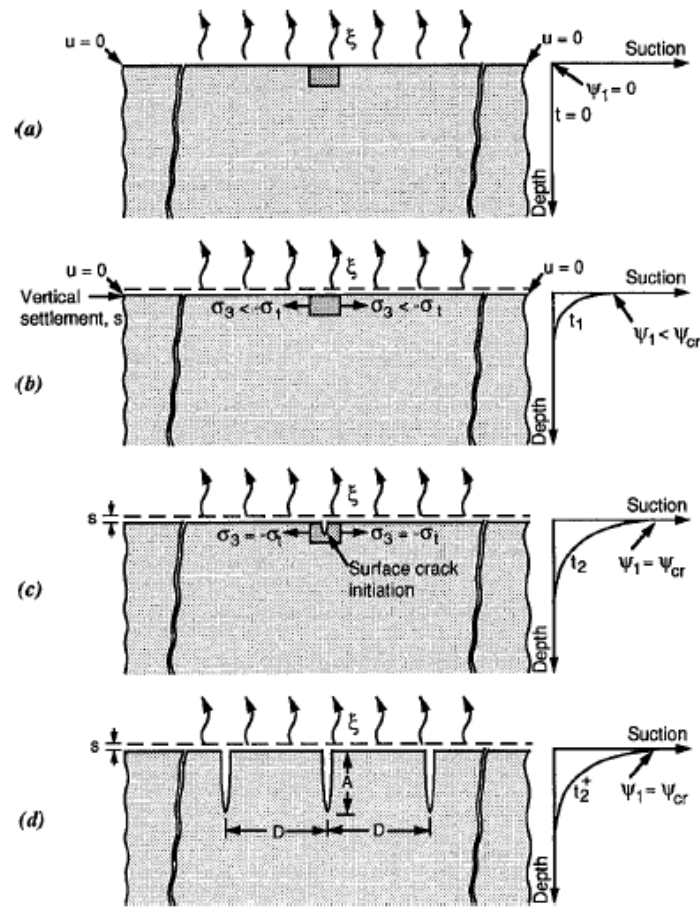


Figura 2.28 - Ilustración esquemática del agrietamiento. (Konrad & Ayad, 1997b)

La condición de inicio de la fisura es la siguiente:

$$\sigma_3 = -\sigma_t \quad (2.17)$$

Donde σ_3 es la tensión principal menor en la superficie del suelo (tensión horizontal).

La presión de poro negativa (succión) cuando se inicia la fisura ψ_{cr} , depende de la resistencia a tracción del suelo, el estado inicial de tensiones, y de las trayectorias de tensiones totales y efectivas durante el proceso de retracción y consolidación y de la historia de tensiones del suelo (Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995).

2.4.2.5. Predicción de la Profundidad de la Grieta en el Inicio

Una vez que una grieta se inicie en la superficie del terreno, es posible calcular su longitud si se asume que se cumple la teoría de MFLE, que es el caso cuando la longitud inicial de la grieta alcanza la longitud mínima en la cual ocurre la propagación instantánea de la grieta. Según la teoría de MFLE, la profundidad de la grieta A, depende de la distribución de tensiones de

tracción aplicada a los lados de la grieta y del valor del factor de la intensidad de tensiones K_I , que cambia con la longitud de la grieta. Ambos factores se discuten abajo.

2.4.2.6. Predicción del Espaciamiento Medio entre las Grietas

La evidencia de campo sugiere que el espaciamiento de la grieta es finito. Se propone así considerar, en forma similar a Lachenbruch (1961), que otra grieta puede salir cuando la tensión horizontal total predicha en la dirección “y” alcanza el 95% del valor de la resistencia a tracción. Aunque esto pueda parecer un valor arbitrario, puede ser calibrado con observaciones de campo según lo sugerido por Lachenbruch (1961). Se anticipa que este valor puede depender de tipo del suelo y de otros factores. Por ahora, sin embargo, no es crítico al modelo propuesto puesto que debe ser visto como una manera de resolver un problema que es en realidad muy complejo.

2.4.3. Interpretación Geométrica de los Patrones de Agrietamiento (Probabilística)

Desde los primeros trabajos en el campo de la desecación, se ha intentado cuantificar de alguna manera el patrón de agrietamiento obtenido luego del proceso. Una interpretación probabilística, no es una búsqueda de las razones geotécnicas por las cuales suceden los procesos sino un estudio de los resultados buscando patrones repetidos.

En el trabajo de Corte & Higashi (1960), del análisis geométrico, se deduce que el área media de las celdas producidas por agrietamiento depende solo de la longitud de las grietas por unidad de área y son independientes de condicionantes externos. Haciendo un sencillo análisis geométrico se demuestra que en un plano la figura que define un patrón de agrietamiento con celdas de áreas constantes y que además tiene el menor perímetro es el hexágono.

Los patrones básicos de grietas primarias son los triangulares, cuadrados y hexagonales Figura 2.29, que luego se subdividen mediante grietas secundarias en polígonos menores. Sin embargo, a pesar del gasto extra de energía los patrones más abundantes son los rectangulares y pentagonales Figura 2.30. Esto se explica debido a la existencia de grietas primarias y secundarias. La subdivisión no se puede dar en las esquinas porque allí las tensiones se han relajado, las nuevas grietas van desde y hasta las mitades de los lados de los polígonos definidos por grietas primarias. La probabilidad de que se produzcan ciertos patrones u otros es diferente y de esta probabilidad dependerá el patrón final.

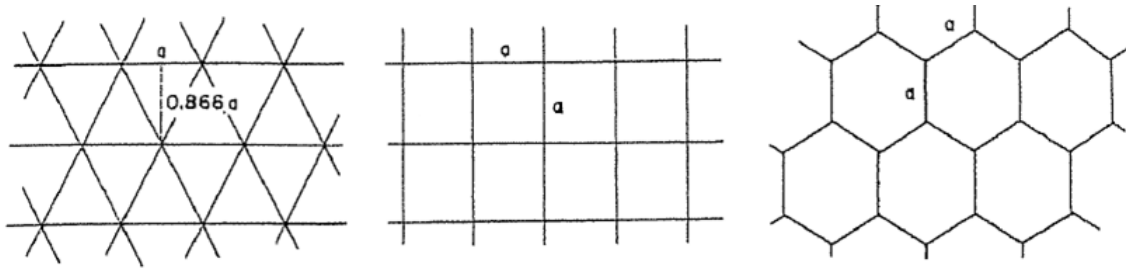


Figura 2.29 - Patrones de agrietamiento posibles en una superficie plana. (Corte & Higashi, 1960).

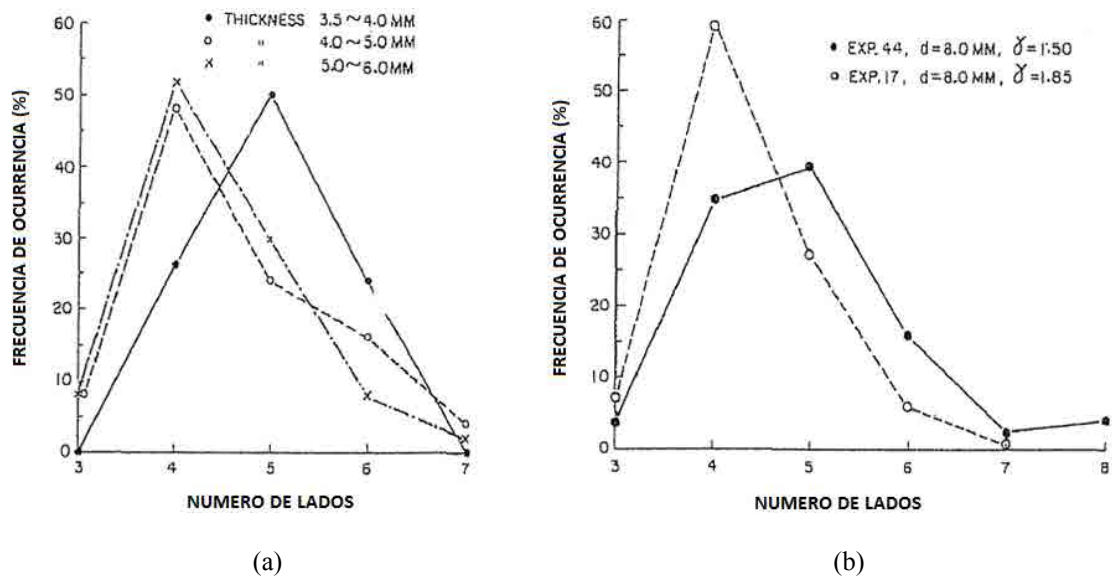


Figura 2.30 – Efecto del espesor de la muestra y del grado de compactación del suelo: a) Numero de lados de las celdas para diferentes espesores; b) Numero de lados de celdas para distintas compactaciones. (Corte & Higashi, 1960).

En el artículo de Nahlawi & Kodikara (2006) basado en un análisis estadístico de los resultados de laboratorio de la arcilla de Werribee, la separación entre grietas s y el área media de las celdas \bar{A} se pueden modelar mediante una distribución log-normal.

2.4.4. Interpretación Geo-Mecánica de los Patrones de Agrietamiento (Determinista)

A pesar de la aparente aleatoriedad del fenómeno de desecación en cuanto a patrones de agrietamiento, ha sido objetivo de estudio en este campo, la búsqueda de las razones de orden geo-mecánico en el inicio y propagación de las grietas.

En el trabajo de Corte & Higashi (1960) se establece que a diferencia de los sólidos, el suelo cuando se agrieta pierde masa por pérdida de agua. El agrietamiento en suelos no se puede considerar frágil y la velocidad de agrietamiento es menor que en sólidos que es del orden de la velocidad del sonido. La concentración de tensiones se produce debido a las restricciones en los contornos donde el suelo se adhiere a la bandeja.

La tensión de rotura varía con el espesor de la muestra porque el contenido de humedad varia con el espesor. Esta variación del contenido de humedad afecta a la deformación virtual que se postula igual a la diferencia entre la deformación actual del suelo y a la que tendría sin restricciones. Se propone una relación entre la resistencia del suelo a la rotura y el espesor de la muestra así como también una variación del módulo de Young.

Para muestras delgadas pude asumirse que la desecación es un proceso isótropo y que la relación tensión-deformación viene dada, según Kodikara, et al. (2000) y Fredlund & Morgenstern (1976), por:

$$d\varepsilon_{ii} = \frac{d\psi}{H(\psi)} \quad (2.18)$$

Donde $d\varepsilon_{ii}$, es el incremento de deformación volumétrica, $d\psi$ es el incremento de succión matricial y $H(\psi)$ es el módulo de deformación del suelo debido a cambios en la succión.

En los primeros momentos del ensayo, la velocidad de pérdida de agua es mayor en la superficie superior. Esto produce mayores valores de succión en dicha zona. Sin embargo, en ese momento el módulo $H(\psi)$ es muy bajo y la retracción es predominantemente lineal. Cuando la desecación progresa, debido a que la velocidad de secado es mayor en la superficie superior, la tendencia es que se produzca un arqueado ligero levantando los extremos de la muestra. Posteriormente, la velocidad de secado se hace mayor en la base de la muestra y la rigidez en la zona superior es ahora más alta que en la zona inferior. Esto propicia el arqueado de la zona media de la muestra hacia arriba y progresa hasta el final del ensayo.

También para muestras delgadas, (Nahlawi & Kodikara, 2006), y para analizar la evolución de los ensayos, han definido una tasa o velocidad (ratio) de desecación y un coeficiente de desecación:

$$(w - w_r) = (w_i - w_r)e^{-kt} \quad (2.19)$$

Así: $\frac{dw}{dt} = -k(w - w_r)$; donde: w_i es el contenido de agua inicial, w es el contenido de humedad en el tiempo t del proceso de desecación, y w_r es el contenido de agua residual al final del proceso. La tasa de desecación es dw/dt , y k es el coeficiente de desecación. Así la tasa de desecación es directamente proporcional al coeficiente de desecación.

Se ha visto además una fuerte dependencia entre el contenido de agua al momento del agrietamiento y la tasa de desecación. Contenidos bajos de humedad y por lo tanto valores altos de tensión de tracción son necesarios para iniciar las grietas cuando la tasa de desecación es más alta.

En este mismo artículo, respecto del espaciado de las grietas, se analizan los resultados de Corte & Higashi (1960) y Lau (1987) además de los resultados de la arcilla de Werribee. Llamando \bar{A} al área media de las celdas que queda formadas luego de la desecación, d al espesor final de la muestra y \bar{s} al espacio total entre grietas divididas por el número total de grietas, se observa que el área \bar{A} aumenta con el espesor d en todos los casos. Se han hecho consideraciones para corregir la diferencia entre la forma de las muestras usadas en los ensayos de la arcilla de Werribee y los de Corte & Higashi (1960) y Lau (1987). También se observó que la relación \bar{s}/d disminuye con el aumento de espesor d .

2.5. Vertiente Numérica

En esta sección se presenta el análisis de 5 artículos de revista y 1 artículo de congreso, pasando por los primeros intentos de simulación de agrietamiento mediante la MFLE (Lee & K.W. Lo, 1988) y hasta las actuales simulaciones basadas en el MEF (Kodikara, et al., 2004; Rodríguez, et al., 2007; Trabelsi, et al., 2012); Elementos Discretos (DEM) (Sima, et al., 2013) y el Método del Elemento Distinto (Amarasiri, et al., 2011). Aunque existen muchas más variantes se considera que estos artículos representan bien el estado del arte de la vertiente numérica en materia de simulación del problema de desecación y agrietamiento.

Aunque desde el inicio se estableció la necesidad de tratar el agrietamiento en los problemas de desecación, el uso de la MF no fue inmediato. De hecho Lau (1987) concluye que el uso de la MF no es idóneo para este problema. Sin embargo Lee & K.W. Lo (1988) proponen un modelo simple basado en el MEF y en la MFLE para tratar las grietas por tensión en suelos.

A lo largo del tiempo se han propuesto y desarrollado distintas alternativas para la simulación de los procesos de desecación y agrietamiento además de los mencionados arriba (Abu-Hejleh & Znidarcic, 1995), (Ayad, et al., 1997), (Prat, et al., 2002), (Peron, et al., 2009). Existen dos vertientes bien diferenciadas en materia de simulación de este problema, la primera basada en el desarrollo de códigos académicos desarrollados para problemas geotécnicos más o menos específicos y la segunda los códigos comerciales que ofrecen más o menos flexibilidad en cuanto a implementación.

2.5.1. El Problema de Fractura en Suelos (Lee & K.W. Lo, 1988)

En lo que se refiere al agrietamiento por desecación, interesa definir mediante algún modelo el momento del inicio de agrietamiento y la propagación de agrietamiento (cantidad y dirección), teniendo en cuenta la variación de la resistencia a tracción en función de la succión o el contenido de humedad del suelo además de la tenacidad de fractura que será también función del grado de humedad.

El suelo sometido a tracción tiene a agrietarse. En su trabajo, Lee & K.W. Lo (1988), proponen un modelo de elementos finitos para la simulación de la propagación de grietas por tracción en suelos. Las características principales de este modelo, en cuanto a la fractura, son el desdoblamiento de un nodo en dos durante el avance de la grieta en el extremo de una fisura para reproducir la separación del material a cada lado de la grieta, y el uso del criterio de MF para predecir la propagación de la grieta. El parámetro material empleado para este criterio, se determina experimentalmente y se muestra razonablemente constante para una determinada gama de longitudes de fisuras. Por esta razón puede adoptarse a este parámetro como una constante de grietas por tracción en suelos.

Este artículo simula la separación física del material en los dos lados que forman una grieta. La apertura de la grieta se simula mediante la separación de un nodo O en otros dos O' y O'' al comenzar el agrietamiento en la punta de una fisura existente, tal como muestra la Figura 2.31. Para tener en cuenta la concentración de tensiones en la punta de la grieta, se utiliza un criterio de MF para evaluar si una grieta existente puede propagar. El parámetro material empleado para este criterio es la tasa crítica de liberación de energía G_c .

Los resultados experimentales muestran que G_c es un parámetro adecuado y es constante para un suelo dado.

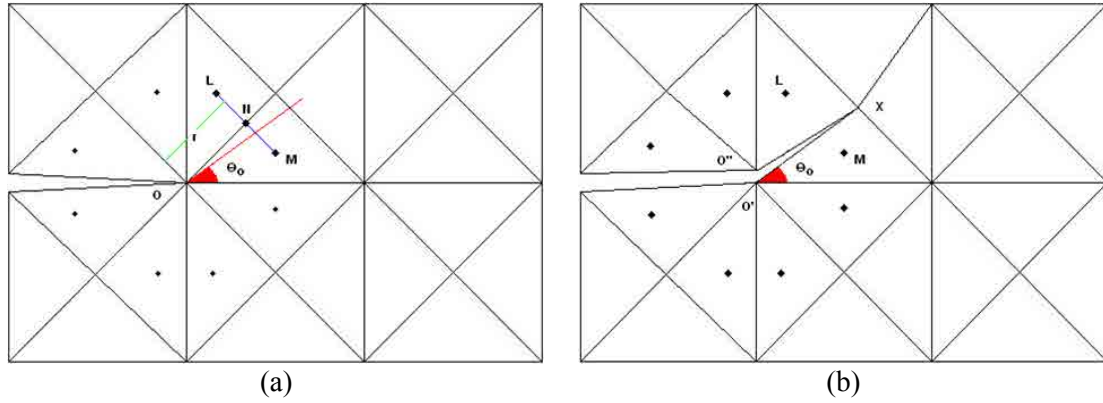


Figura 2.31 - Mecanismo propuesto de propagación: a) *Antes de propagar la grieta*; b) *después de propagar la grieta*. (Lee & K.W. Lo, 1988).

2.5.1.1. Criterio de Propagación de Grietas

El punto de partida del modelo es determinar el campo de tensiones en las proximidades de la punta de la grieta, más allá de la cual las tensiones son insignificantes. Para el problema bidimensional en un continuo lineal elástico infinito, el campo de tensiones cercano a la punta de la grieta puede expresarse en términos de las coordenadas polares mediante la siguiente ecuación matricial (Erdogan & Sih, 1963 e Ingrassia, 1978).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \\ \cos^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{Bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - 3\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \\ -3\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - 3\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

En la cual r y θ son las coordenadas polares consideradas; K_I y K_{II} , factores de intensidad de tensiones en modo I y II respectivamente (Irwin, 1958); y σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ y $\sigma_{r\theta}$, tensiones radial, circunferencial y cortante respectivamente.

El criterio de propagación de grietas adoptado aquí es el criterio de la máxima tensión circunferencial, en el cual la grieta se propaga desde la punta de una grieta existente en la dirección normal a la máxima tensión circunferencial (Erdogan & Sih, 1963). De la ecuación (2.20):

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[K_I \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin\theta \right] \quad (2.21)$$

El máximo valor de $\sigma_{\theta\theta}\sqrt{2\pi r}$ con respecto a θ , denotado por $(\sigma_{\theta\theta})_{max}\sqrt{2\pi r}$, está dado por:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{max}\sqrt{2\pi r} = \cos\left(\frac{\theta_0}{2}\right) \left[K_I \cos^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right) - \frac{3}{2} K_{II} \sin\theta_0 \right] \quad (2.22)$$

Donde θ_0 es la dirección correspondiente a $(\sigma_{\theta\theta})_{max}$ para cualquier longitud del radio r . De acuerdo al criterio de la máxima tensión circunferencial, θ_0 es también la dirección de la propagación de la grieta.

La tensión de propagación de la grieta es tal que:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{max}\sqrt{2\pi r} = K_{IC} \quad (2.23)$$

Donde K_{IC} es el factor de intensidad de tensiones en modo I o tenacidad de fractura (Erdogan & Sih, 1963) y está relacionado con la tasa crítica de liberación de energía de (Griffith, 1924), G_c , mediante la siguiente expresión (Irwin, 1958):

$$G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E}; \quad \text{para tensión plana} \quad (2.24)$$

$$G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E} (1 - \nu^2); \quad \text{para deformación plana} \quad (2.25)$$

Donde E es el módulo de Young; y ν es el coeficiente de Poisson.

Así, una vez que han sido determinadas las constantes del material, G_c , E , y ν en ensayos de laboratorios, K_{IC} , puede ser deducida y usada en el criterio de propagación de grietas dado por ecuación (2.23) cuando se resuelven problemas de contorno.

2.5.1.2. Criterio de Iniciación de la Grieta

La ecuación (2.20) se aplica solamente a casos donde el agrietamiento ha comenzado. Antes de la aparición de las grietas, el material puede estudiarse como un continuo en el cual no hay concentraciones de tensiones. El criterio de resistencia a tracción, consiste en comparar la tensión principal de tracción y la resistencia a tracción σ_t determinada experimentalmente. Esta comparación se utiliza para predecir el inicio del agrietamiento.

2.5.1.3. Modelo de Elementos Finitos

Una vez obtenido G_c , el factor de intensidad de tensiones se calcula mediante $G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E}$ (tensión plana) ó $G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E} (1 - \nu^2)$ (deformación plana). Esta sección propone un modelo de elementos finitos usando una aproximación de MF con K_{IC} , como criterio de propagación de grietas.

Se usan elementos finitos triangulares de deformación constante. Aunque la singularidad de las tensiones en el extremo de las grietas no son bien modeladas por este elemento, permite implementar fácilmente el mecanismo de apertura propuesto por el modelo, independientemente de donde se haya iniciado la grieta y de la etapa de carga, permitiendo un método de resolución totalmente automático.

Observando la Figura 2.31, tenemos que en los centros de gravedad de los elementos triangulares conocemos las componentes cartesianas de tensiones. Con estas por ejemplo en los puntos L y M podemos calcular los promedios de tensiones y considerarlos como el estado de tensiones en un punto como el N. La ubicación de N se calcula promediando la ubicación de los centros de gravedad de los triángulos adyacentes. Así, por ejemplo, el estado de tensiones en el punto N, de la Figura 2.31, se calcula en término de las tensiones en los centros de gravedad de los puntos L y M:

$$\sigma_{XX_N} = \frac{1}{2}(\sigma_{XX_L} + \sigma_{XX_M}) \quad (2.26)$$

$$\sigma_{YY_N} = \frac{1}{2}(\sigma_{YY_L} + \sigma_{YY_M}) \quad (2.27)$$

$$\sigma_{XY_N} = \frac{1}{2}(\sigma_{XY_L} + \sigma_{XY_M}) \quad (2.28)$$

$$X_N = \frac{1}{2}(X_L + X_M) \quad (2.29)$$

$$Y_N = \frac{1}{2}(Y_L + Y_M) \quad (2.30)$$

Este modelo establece que la grieta se propagará en dirección normal a la máxima tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ actuante. Esto es según lo planteado por (Erdogan & Sih, 1963) que el criterio de propagación de fisura viene dado por $(\sigma_{\theta\theta})_{max} \sqrt{2\pi r} = K_{IC}$, donde K_{IC} es la tenacidad a fractura de la teoría de (LEFM), y r es un radio cualquiera a partir de la punta de la grieta, trazado en una cierta dirección θ_0 . K_{IC} se determina según el caso mediante $G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E}$ (tensión plana) ó $G_c = \frac{(K_{IC})^2}{E} (1 - \nu^2)$ (deformación plana). G_c se determina en laboratorio.

Sea la Figura 2.31a, un problema de contorno resuelto por elementos finitos, como los triángulos tienen funciones de forma lineales, las deformaciones y las tensiones serán constantes en ellos. Así, supongamos que tenemos el valor de las tensiones cartesianas en los centros de gravedad de los triángulos (puntos L y M), con estas podemos calcular las tensiones circunferenciales correspondientes a los radios que unen la punta de la grieta y los puntos L y M. También tenemos calculadas las tensiones en el punto N como promedio de las tensiones en L y M. Con estos tres puntos podemos trazar un gráfico de tensiones circunferenciales respecto del ángulo θ , e interpolar mediante una ecuación cúbica. De esta ecuación calculando la derivada e igualando a cero podemos obtener el valor de la máxima tensión circunferencial y el valor de θ_0 . Verificando el criterio de progreso de fractura se produce esta propagación en la dirección θ_0 , separando el nodo O en O' y O'', pasando la punta de la grieta a una nueva posición X.

2.5.2. Método de las Diferencias Finitas (FLAC)

En el artículo de Kodikara, et al., (2004) se presenta la simulación numérica de los ensayos de arqueo presentados en el artículo de Nahlawi & Kodikara (2002). Ver apartado 2.3.5.2 Arqueo (Curling) de este Estado del Arte. La aproximación numérica se hace utilizando el programa comercial FLAC, basado en el MDF. Como el programa no tiene implementado el problema de flujo en medio poroso, puesto que solo resuelve el problema mecánico, se utiliza una analogía térmica utilizando los valores de humedad medidos en el laboratorio para imponer valores de succión en los bordes superior e inferior de la muestra de suelo. Se simula el contacto entre el suelo y la bandeja contenedora. Durante la desecación se ha visto en el laboratorio, que la muestra primero se contrae uniformemente. A continuación presenta un arqueo levantando sus extremos ligeramente. Esto se explica porque es esa etapa la retracción es mayor en el contorno superior (Figura 2.32a). Tiempo después, el arqueo se invierte puesto que la evaporación es mayor en el contorno inferior y el suelo es más rígido en el contorno superior debido a que está más reseco. El perfil de deformación de esta etapa se muestra en la Figura 2.32b.

La curva de retención del suelo utilizado en los ensayos se muestra en la Figura 2.33 Se ha tenido en cuenta la variación del módulo de succión H con la succión tal como puede verse en la Figura 2.34. En la Figura 2.35 se observan las mediciones de succión en función del tiempo en el contorno superior e inferior de la muestra en desecación.

En la Figura 2.36 se presentan los resultados obtenidos con el programa FLAC. Se ha podido reproducir la retracción isótropa inicial, el arqueo hacia arriba (cóncavo) y el arqueo final (convexo).

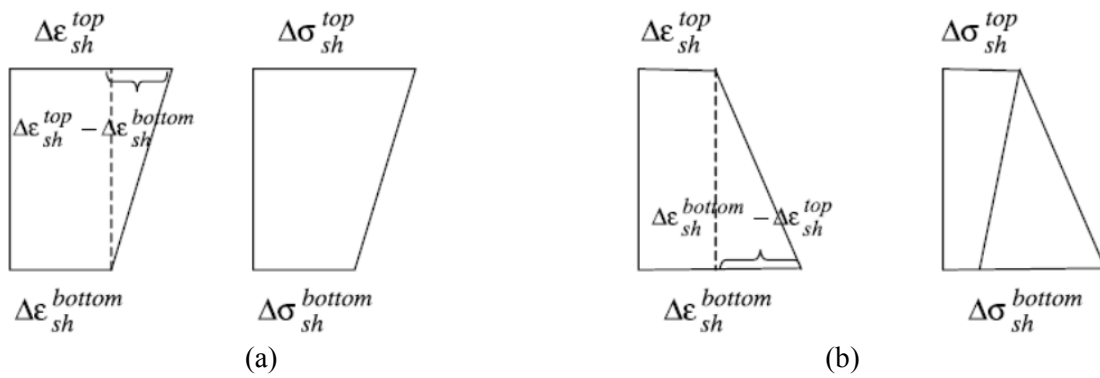


Figura 2.32 - Perfiles idealizados de deformación y tensión por retracción: *a) arqueado hacia arriba (cóncavo); b) arqueado hacia abajo (convexo)* (Kodikara, et al., 2004).

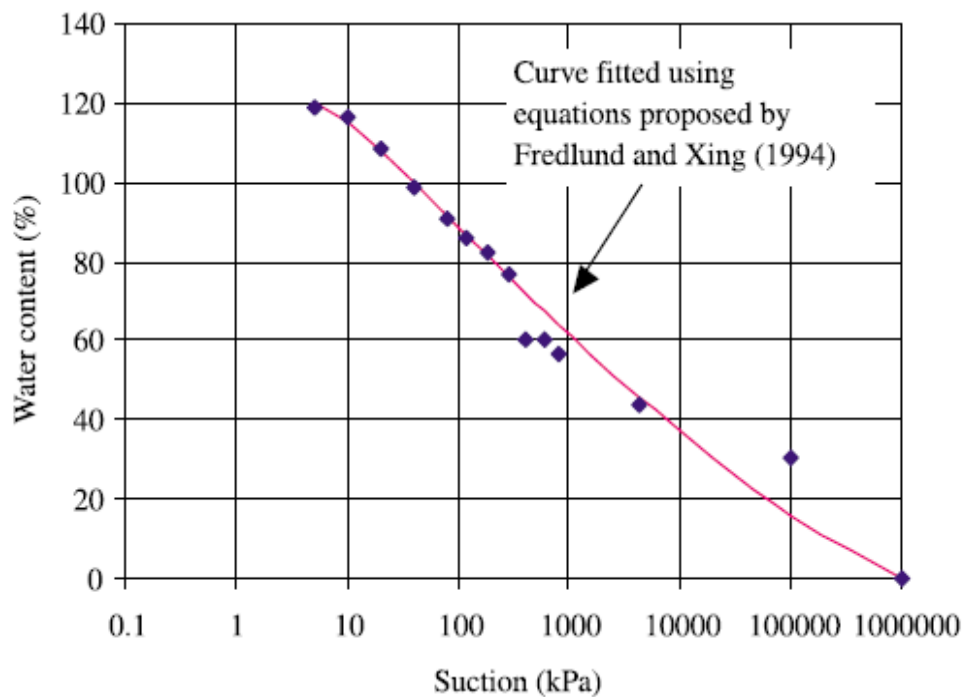


Figura 2.33 - Curva de retención del suelo, *Arcilla de Werribee* (Kodikara, et al., 2004).

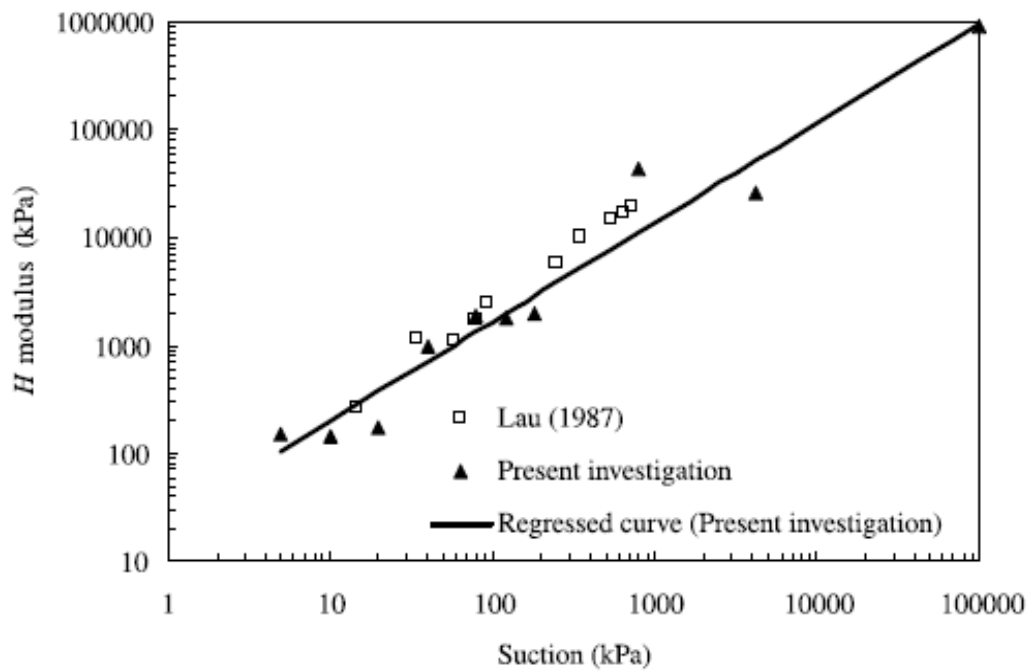


Figura 2.34 - Modulo de succión vs succión (Kodikara, et al., 2004).

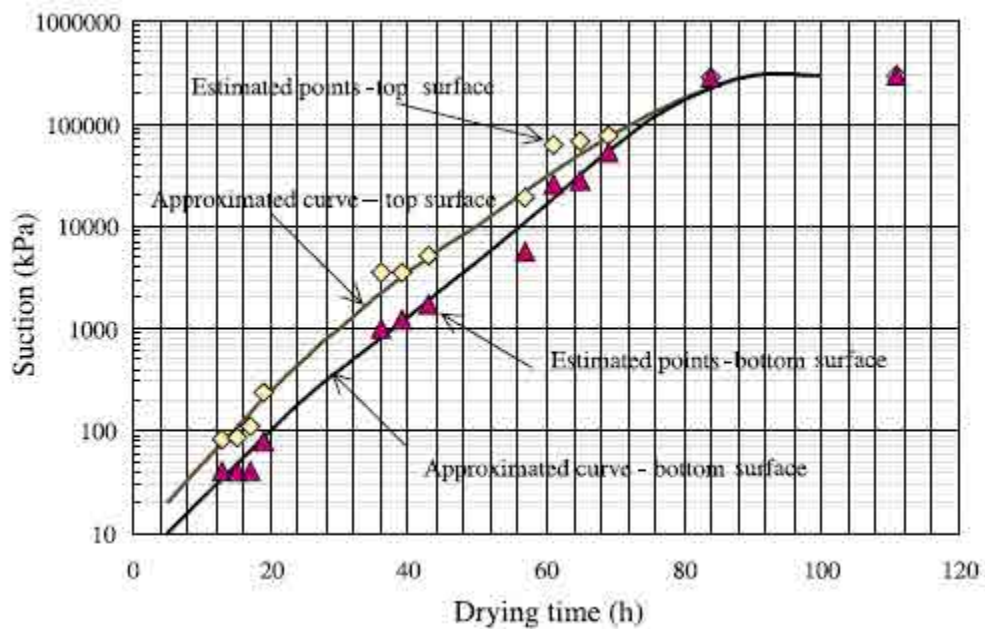


Figura 2.35 - Valores estimados de succión en las superficies superior e inferior de la muestra, bajo 40% de humedad relativa y 18°C de temperatura (Kodikara, et al., 2004).

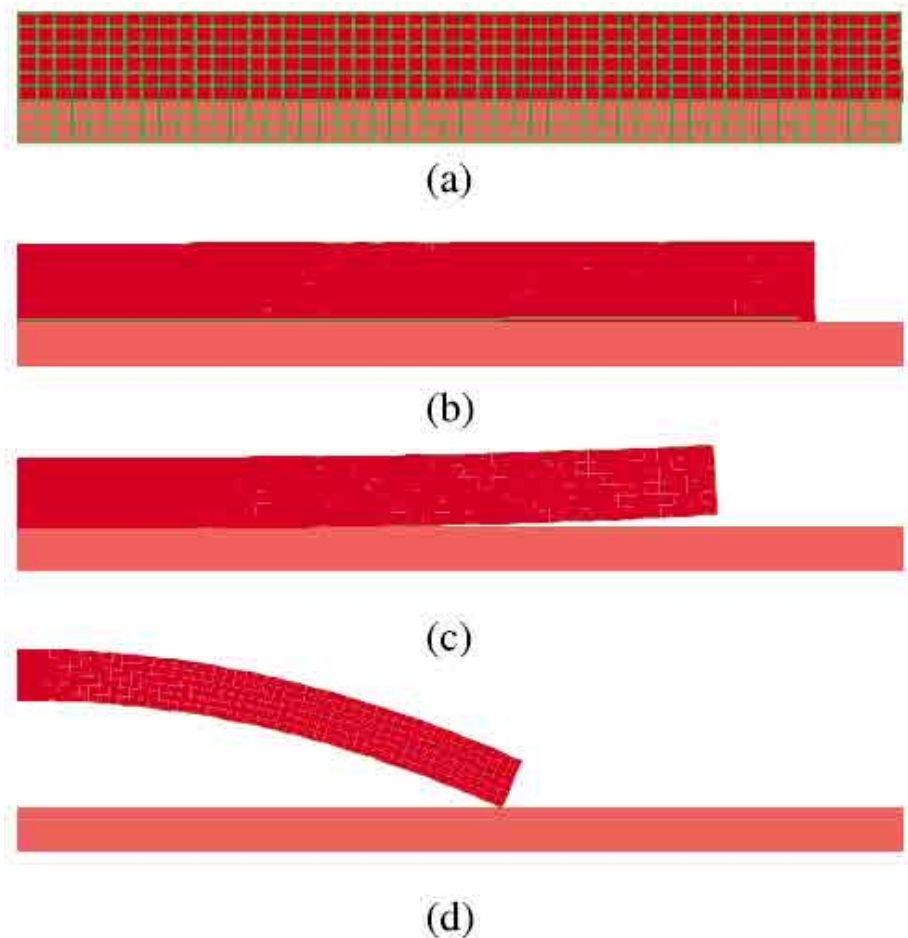


Figura 2.36 - Etapas de simulación del arqueo con el programa FLAC (Kodikara, et al., 2004).

2.5.3. Programa Code_Bright (MEF)

En sus trabajos, Rodríguez, et al. (2007) y Trabelsi, et al. (2012), presentan una análisis experimental y numérico del problema de desecación. El primero estudiado un residuo minero y simulando el problema de desecación hasta el inicio de agrietamiento en 1D. El segundo estudia el comportamiento de un suelo arcilloso de Túnez e incluye un análisis de agrietamiento.

Ambos autores han adaptado el programa CODE_BRIGHT (Olivella, et al., 1996), que resuelve el flujo en medio poroso deformable mediante el MEF.

2.5.3.1. Ecuaciones de Balance del Programa Code_Bright

Las ecuaciones de balance, en las que se basa el programa Code_Bright, son las de balance de sólidos y de balance de agua respectivamente y se escriben a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_s(1-n)] + \nabla(\mathbf{j}_s) = 0 \quad (2.31)$$

Donde ρ_s es la masa de sólido por unidad de volumen de sólido, n es la porosidad, \mathbf{j}_s es el flujo de masa de sólido, t es el tiempo y ∇ es el operador divergencia. La variable principal asociada con esta ecuación es la porosidad y sus variaciones pueden calcularse resolviendo la ecuación (2.32).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_l^w S_l n + \theta_g^w S_g n) + \nabla(\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (2.32)$$

Donde θ_l^w y θ_g^w son las masas de agua y gas por unidad de volumen respectivamente; S_l y S_g son las fracciones volumétricas de poros ocupadas por el líquido y el gas respectivamente (grados de saturación de las fases respectivas); \mathbf{j}_l^w y \mathbf{j}_g^w flujos totales de masa de agua en la fase líquida y de vapor de agua en la fase gaseosa, respectivamente; f^w es el suministro externo de agua.

El balance de momento del medio poroso se reduce a la ecuación de equilibrio en tensiones totales:

$$\nabla \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (2.33)$$

Donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones y \mathbf{b} es el vector de fuerzas de masa. Mediante una ecuación constitutiva adecuada la ecuación de equilibrio se transforma en una expresión en función de los desplazamientos y de las presiones de poro. Se asumen pequeñas deformaciones y la variable principal en esta ecuación son los desplazamientos.

2.5.3.2. Ecuaciones Constitutivas del Modelo Code_Bright

(Rodríguez, et al., 2007) utiliza un modelo constitutivo mecánico sencillo basado en el concepto de superficies de estado (Matyas & Radhakrishna, 1968 y Lloret & Alonso, 1985).

$$\Delta e = a_1 \Delta \ln(p' + a_4) + a_2 \Delta \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) + a_3 \Delta \left[\ln(p' + a_4) \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) \right] \quad (2.34)$$

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.35)$$

Donde p' es la tensión media neta, s es la succión, e es la relación de vacíos, p_{ref} es una presión de referencia para evitar logaritmos de cero en condiciones saturadas $s = 0$, ε_v es la deformación volumétrica y e_0 es la relación de vacíos inicial.

El flujo de la fase líquida se calcula usando la ley generalizada de Darcy, que se expresa:

$$\mathbf{q}_l = -\mathbf{K}(\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (2.36)$$

Donde ρ_l es la densidad del líquido, \mathbf{g} es el vector aceleración de la gravedad, P_l es la presión del líquido y \mathbf{K} es el tensor de permeabilidad del líquido, que se evalúa:

$$\mathbf{K} = \mathbf{k} \frac{k_{rl}}{\mu_l} \quad (2.37)$$

Donde k_{rl} es la permeabilidad relativa, que depende del grado de saturación, μ_l es la viscosidad dinámica del líquido y \mathbf{k} es el tensor de permeabilidad intrínseco que depende de la estructura porosa.

La permeabilidad relativa se evalúa según Fredlund & Rahardjo (1993) y por simplicidad se adopta una expresión potencial

$$k_{rl} = (S_l)^r \quad (2.38)$$

Finalmente, la ecuación constitutiva que relaciona el grado de saturación con la succión es la curva de retención. En este caso se aproxima la curva de retención mediante la expresión de VanGenuchten (1980):

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0 f_n} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (2.39)$$

Donde λ , es un parámetro material y P_0 es el valor de entrada de aire a la porosidad n_0 , adoptado como un valor de referencia. f_n , es una función propuesta que tiene en cuenta la influencia de la porosidad en la curva de retención. La función f_n se escribe:

$$f_n = \exp[-\eta(n - n_0)] \quad (2.40)$$

Donde η es un parámetro material, n y n_0 son la porosidad y la porosidad inicial respectivamente.

La influencia de la porosidad en la conductividad hidráulica es tomada en cuenta mediante la ley exponencial siguiente:

$$k_{sat} = k_0 \exp[b(n - n_0)] \quad (2.41)$$

Donde b es un parámetro material, k_0 es la permeabilidad inicial de referencia a una porosidad n_0 .

2.5.3.3. Resultados del Análisis de Residuos Mineros

(Rodríguez, et al., 2007) hace una caracterización del material a través de ensayos de laboratorio tales como estudio mineralógico mediante rayos X, obtención de la curva de retención mediante distintos métodos según el rango de succiones, ensayos edométricos, compresión no confinada, ensayos de resistencia a tracción y finalmente ensayos de desecación.

El material es un residuo minero cuyo componente principal es la hematita. Tienen un densidad de 3.97 Mg/m^3 . El 92% de sus partículas son menores de $80\mu\text{m}$. Su límite líquido es de 43.9%, y su límite plástico es de 39.9%. Clasifica como ML (limo de baja plasticidad) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

De los ensayos de desecación se obtienen la evolución de las distintas variables que intervienen en el proceso de secado así como también puede medirse en tiempo en el cual puede verse la primera grieta y su evolución temporal.

Mediante el programa CODE_BRIGHT, se hace un análisis hidro-mecánico acoplado del proceso de secado.

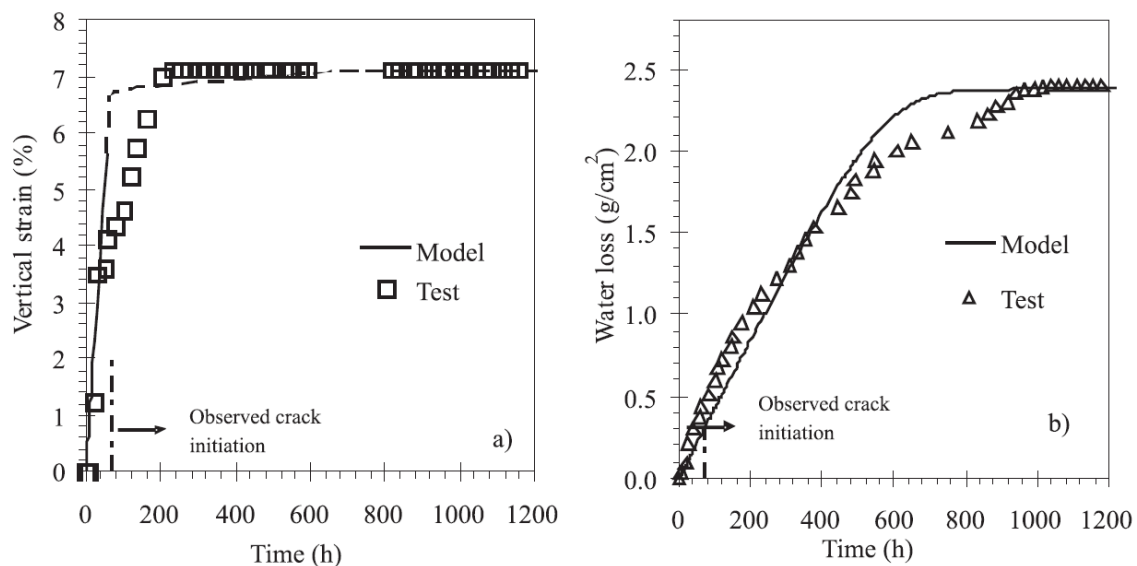


Figura 2.37 - Espécimen bajo desecación en atmósfera de laboratorio de 40 mm de alto y 250 mm de diámetro. Comparación entre lo observado y la simulación: a) Deformación Vertical, b) Perdida de agua con el Tiempo (Rodríguez, et al., 2007).

El modelo se implementó en 1D para simular lo que ocurre en ensayos de desecación en atmósfera de laboratorio y en cámara ambiental. Los resultados de la simulación en atmósfera de laboratorio (*deformación vertical y pérdida de agua en peso por unidad de área con el tiempo*) y su comparación con las mediciones hechas durante el test se pueden ver en la Figura 2.37 (*muestra de 250 mm de diámetro \times 40 mm de alto*). Como puede verse el resultado es bastante ajustado.

En la Figura 2.38 (*muestra de 225 mm de diámetro \times 16 mm de alto*) se observa la pérdida de humedad con el tiempo a la izquierda y a la derecha la evolución de la resistencia a tracción además de la evolución de la tensión horizontal con el tiempo, en ensayo realizado en cámara ambiental. Se ha logrado ajustar el modelo de tal manera que cuando se alcanza la resistencia a tracción se está en el momento en que se han visto las primeras grietas en el ensayo. Con esto se está en condiciones de decir que el modelo es capaz de predecir el instante inicial de agrietamiento.

En la Figura 2.39a se observa la tensión horizontal a diferentes profundidades y tiempos versus succión y resistencia a tracción experimental. En la Figura 2.39b se observa la distribución de la tensión horizontal a lo largo de la muestra de 16 mm de espesor para diferentes tiempos.

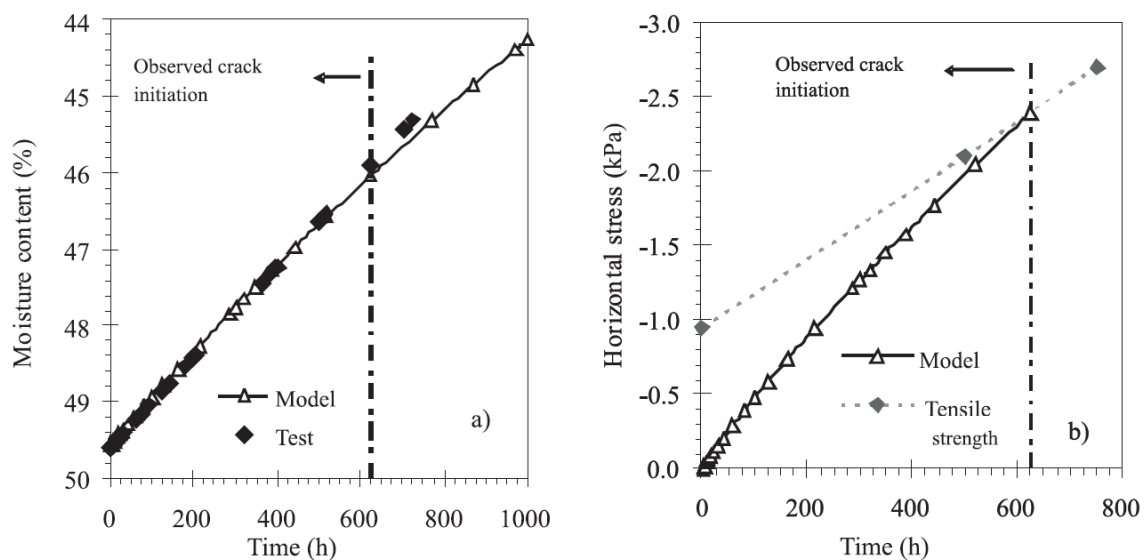


Figura 2.38 - Espécimen en desecación en contenedor cerrado 225 mm de diámetro y 16 mm de alto: a) Evolución del contenido gravimétrico de agua, b) Evolución de la tensión horizontal y la resistencia a tracción (Rodríguez, et al., 2007).

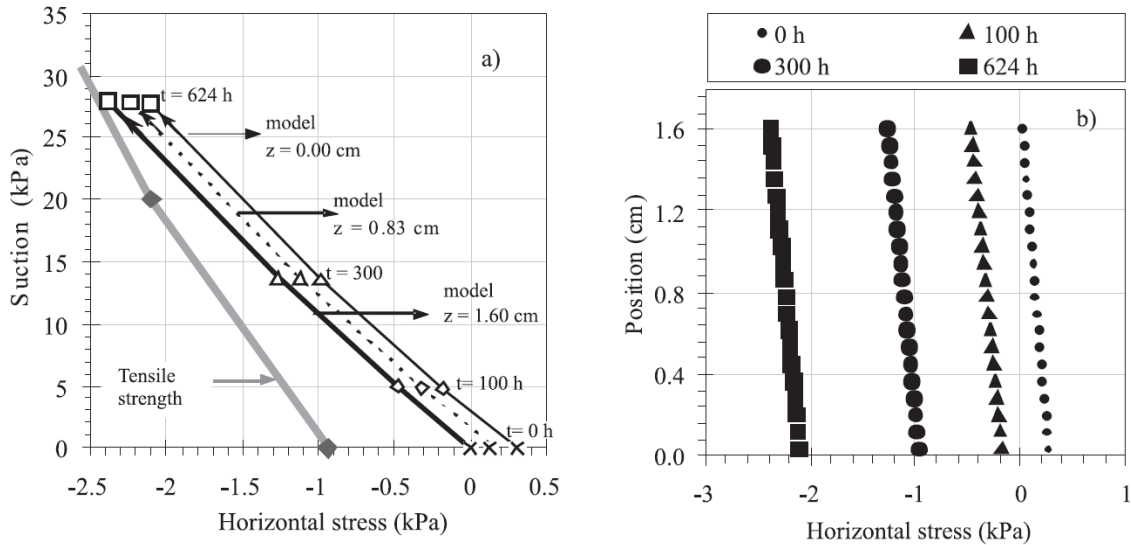


Figura 2.39 – Resultados de la simulación de desecación de residuo minero: a) *Evolución de la tensión horizontal a diferentes profundidades y tiempos vs la succión y la resistencia a tracción horizontal*; b) *Distribución de la tensión horizontal en diferentes tiempos, valores negativos indican tracción* (Rodríguez, et al., 2007).

Del trabajo experimental surgen las siguientes observaciones: (a) la conductividad hidráulica saturada y la curva de retención dependen fuertemente de la porosidad del residuo, lo cual coincide con los resultados presentados por Aubertin et al. (1996, 1998); (b) la conductividad hidráulica del agua, la rigidez y la resistencia a tracción dependen fuertemente del grado de saturación; (c) el contenido gravimétrico de agua y la deformación vertical en el punto de inicio de grieta no se ve afectado por la altura de la muestra (en el rango de 4 a 16 mm); (d) el tiempo necesario para iniciar el agrietamiento es linealmente dependiente del volumen de la muestra; (e) el ratio de evaporación es menor en ensayos con succión controlada en contenedor cerrado que en bandejas en condiciones atmosféricas en el laboratorio y (f) la distancia entre grietas aumenta con la altura de la probeta.

Desde un punto de vista numérico, se observa que este modelo tiene en cuenta los mecanismos fundamentales involucrados en los procesos de desecación. En especial es posible predecir las condiciones de iniciación de grietas, la cual es cuasi-saturada. La generación de grietas por tanto puede resolverse como un problema de contorno. Sin embargo esta aproximación no es capaz de reproducir la propagación de las grietas y solo se restringe al caso 1D.

2.5.3.4. Desecación de Suelo Arcilloso de Túnez

El artículo de Trabelsi, et al. (2012) estudia la desecación y agrietamiento en un suelo arcilloso de Túnez. Plantea un tratamiento tanto experimental como numérico. Como principal aporte desde el punto de vista de modelo numérico, establece que como ya se ha demostrado

anteriormente la resistencia a tracción de los suelos depende del contenido de humedad y por lo tanto de la succión que es una variable fundamental en suelos no saturados. Además, utiliza como variable fundamental del modelo a la porosidad aduciendo que los cambios en la porosidad están directamente relacionados con la retracción del suelo o la eventual aparición de grietas. Así, en zonas donde haya retracción del suelo la porosidad disminuye y en donde haya grietas aumentará considerablemente. El modelo se ha implementado en el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT. Predice la iniciación y la propagación de las grietas. Además, se ha tenido en cuenta la heterogeneidad de los especímenes.

En la Figura 2.40 se presentan los resultados que se obtienen de los ensayos y relacionan la resistencia a tracción con el contenido de agua y con la succión respectivamente.

2.5.3.4.1. Experimentos para Determinar la Resistencia a Tracción

Los experimentos para medir la resistencia a tracción, se basan en trabajos anteriores (Rodríguez, 2002) y consiste en ensayar una muestra de suelo a tracción directa con varios contenidos de humedad y así establecer el link entre esta resistencia y la succión Figura 2.41. Detalles del equipamiento pueden verse en Rodríguez (2002).

Los resultados de los test, (Figura 2.42) muestran que la resistencia a tracción aumenta cuando el grado de saturación disminuye.

Las expresiones que interpolan estos datos son:

$$\sigma_t = a' \exp(-b' \omega) \quad (2.42)$$

Dónde: σ_t es la resistencia a tracción, ω es el contenido de agua, a' y b' son parámetros. Esta ecuación exponencial es válida para un rango entre 19% y 81% de contenido volumétrico de agua.

$$\sigma_t = as + b \quad (2.43)$$

Dónde: s es la succión, a y b son parámetros. El rango de validez en este caso va de 0 a 5 MPa.

Se ha determinado la curva de retención del suelo de Beja, Túnez. En la Figura 2.43 se observa dicha curva de retención.

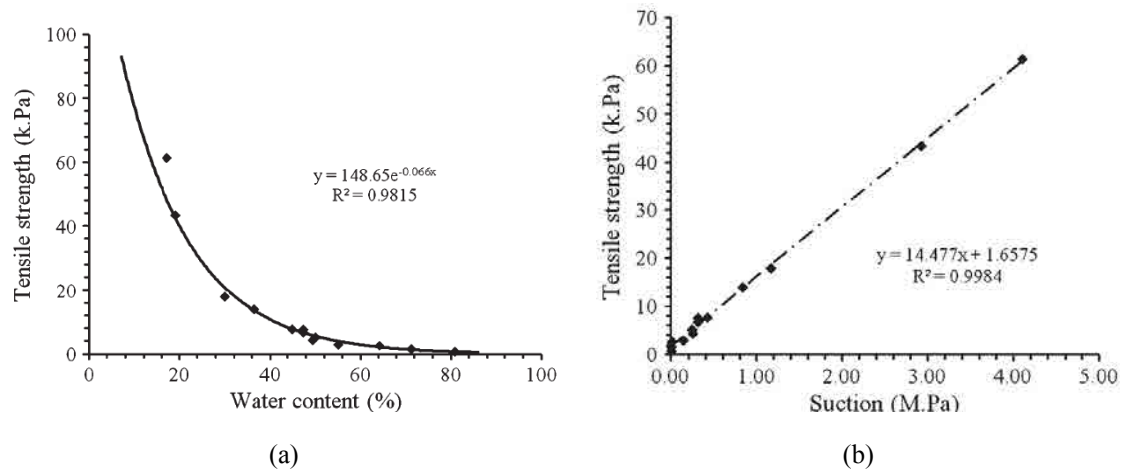


Figura 2.40 – Resultado de los ensayos: a) Resistencia a tracción vs contenido de agua; b) Resistencia a tracción vs succión (Trabelsi, et al., 2012).

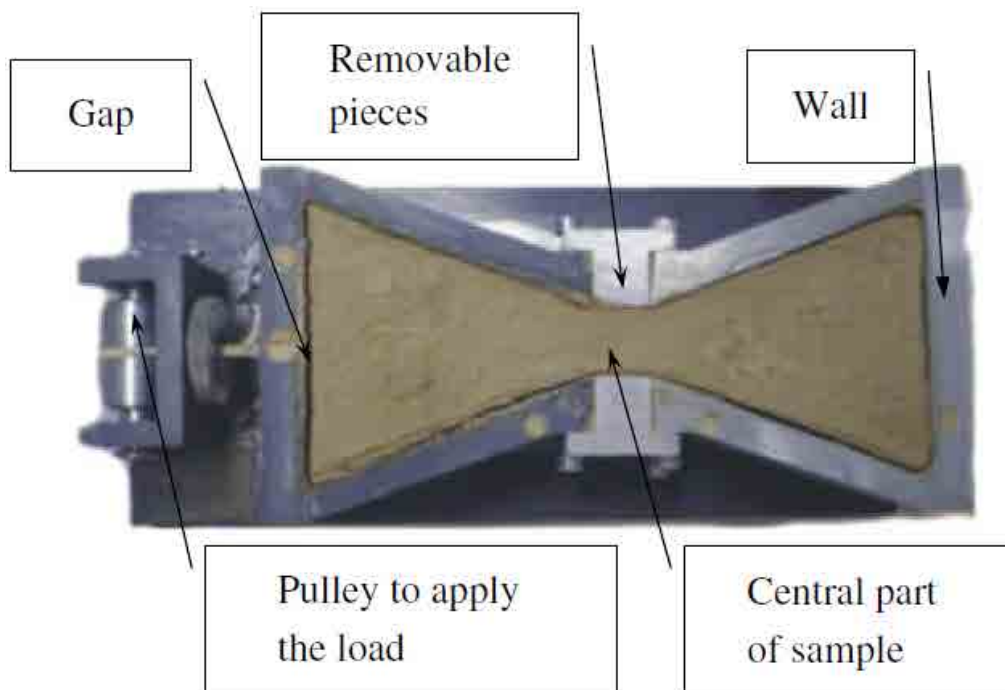
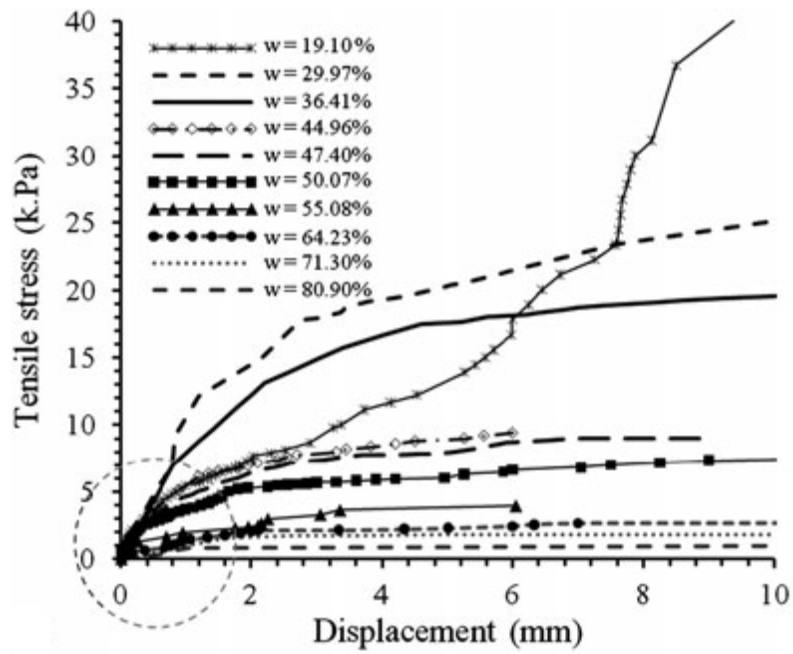
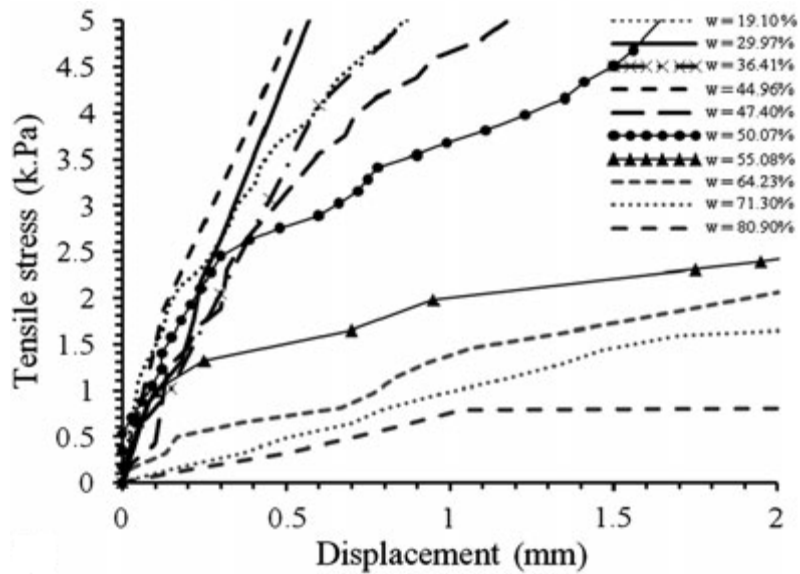


Figura 2.41 - Equipo para ensayo a tracción. Longitud de la muestra 223mm (Trabelsi, et al., 2012).



(a)



(b)

Figura 2.42 - Resultados de los ensayos a tracción para distintas humedades (Trabelsi, et al., 2012).

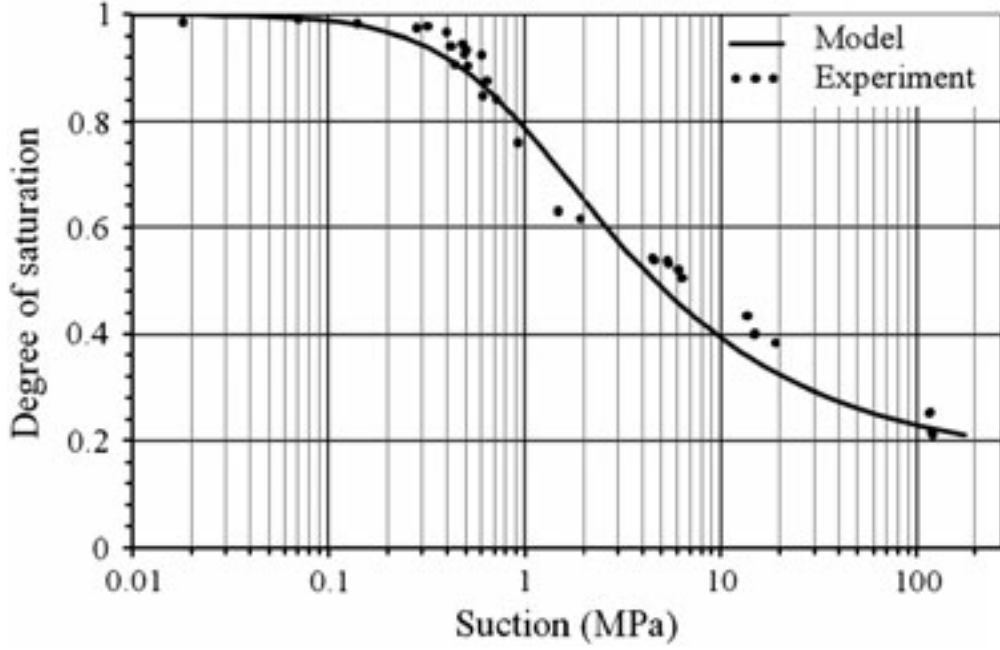


Figura 2.43 - Curva de retención de la arcilla de *Beja, Túnez* (Trabelsi, et al., 2012).

La aproximación de la curva de retención se hizo con la fórmula de (VanGenuchten, 1980) con los siguientes parámetros: $P_0 = 1.6 \text{ MPa}$, $\lambda = 0.33$, $S_{ls} = 1$.

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (2.44)$$

Dónde: P_0 es un parámetro de presión capilar, λ es un parámetro de forma, S_{rl} es la saturación residual y S_{ls} es el grado de saturación máximo.

2.5.3.4.2. Experimentos para Determinar los Patrones de Grietas

Debido a que los patrones de grietas son difíciles de estudiar directamente, se propone el estudio mediante dos coeficientes denominados: Factor de Intensidad de Grietas (CIF: Crack intensity factor) y Densidad de Longitud de Fisura (LF: Length fissure density). Estos parámetros se definen mediante las siguientes expresiones:

$$CIF = \frac{A(X)}{W} [-] \quad (2.45)$$

$$LF = \frac{M_1(X)}{W} [L^{-1}] \quad (2.46)$$

$$M_1(X) = \int_{\partial X} ds [L^{-1}] \quad (2.47)$$

Donde: $A(X)$ es el área de las grietas que se miden como el área de píxeles negros obtenidos a partir de las fotos de los ensayos luego del análisis de imagen. $M_1(X)$ es la integral definida sobre el contorno de las grietas (píxeles negros), W es el área total de la muestra. La Figura 2.44 muestra la evolución de estos parámetros con el tiempo.

La Figura 2.45 muestra la evolución de la succión con el tiempo durante los experimentos y como se ha interpolado esta variación para ser aplicada en CODE_BRIGHT.

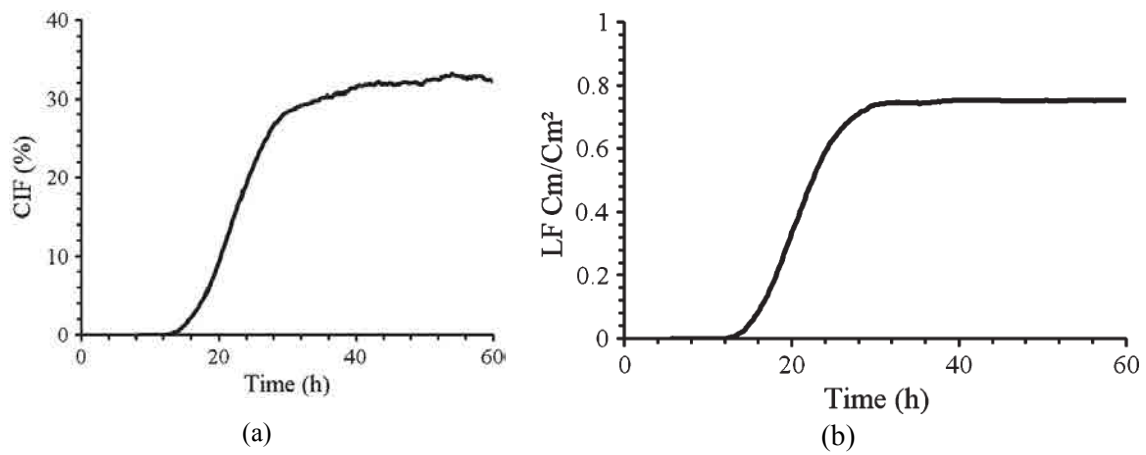


Figura 2.44 - Evolución temporal: a) *Crack Intensity Factor, CIF* y b) *Length Fisure Density, LF* (Trabelsi, et al., 2012).

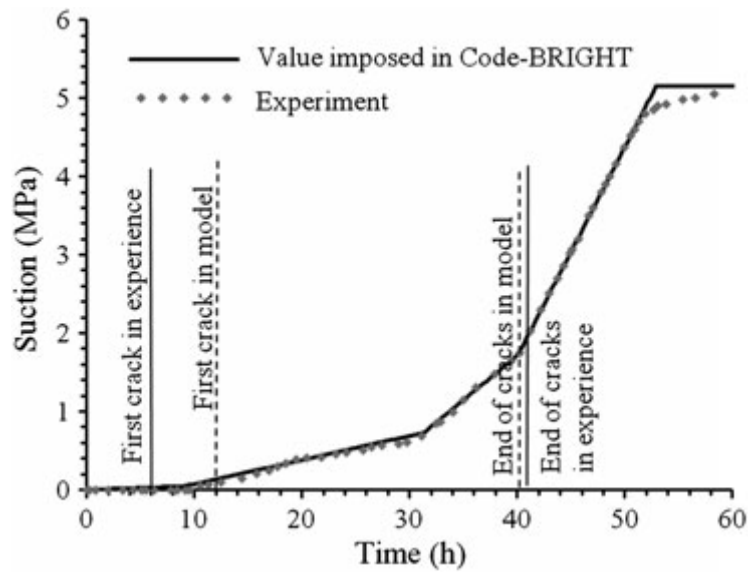


Figura 2.45 - Evolución de la succión con el tiempo. (Trabelsi, et al., 2012).

2.5.3.4.3. Nuevo Modelo Basado en el Criterio de Mohr-Coulomb

Según los resultados experimentales de este artículo, existe una dependencia de la resistencia a tracción con la succión. El modelo considera un criterio de Mohr-Coulomb (Figura 2.46) donde la resistencia a tracción se corresponde con la tensión principal menor ($\sigma_3 = \sigma_L$) y la tensión principal mayor es igual a cero. Se ha adoptado la convención de signos de la MS por lo cual σ_3 resulta negativo. La cohesión se calcula mediante la siguiente expresión en función de la resistencia a tracción y el ángulo de fricción interna.

$$c = \frac{|\sigma_3|}{2} \left(\frac{1 + \sin\varphi}{\cos\varphi} \right) \quad (2.48)$$

Debido a que la resistencia a tracción está relacionada con la succión finalmente podemos escribir:

$$c = c_s(s) = \frac{|\sigma_3|}{2} \left(\frac{1 + \sin\varphi}{\cos\varphi} \right) = \frac{(as + b)}{2} \left(\frac{1 + \sin\varphi}{\cos\varphi} \right) = As + B \quad (2.49)$$

Dónde: c es la cohesión para suelos no saturados, s es la succión, A y B son parámetros del material que se pueden calcular para un valor dado de fricción. B representa la cohesión para el estado saturado.

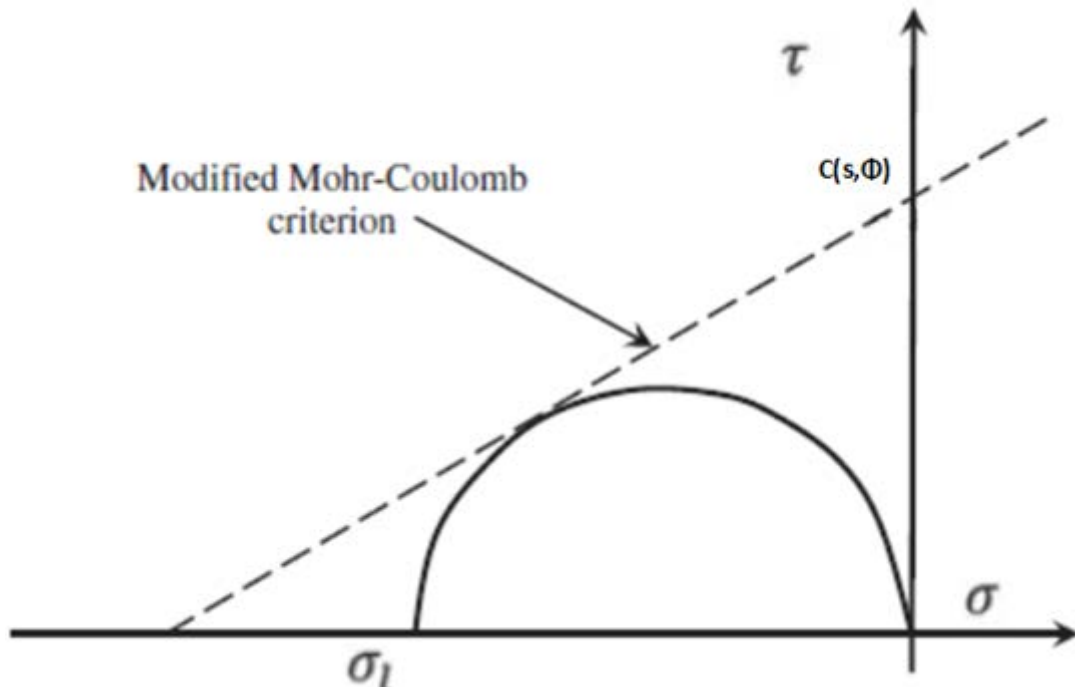


Figura 2.46 - Criterio de Mohr-Coulomb Modificado. (Trabelsi, et al., 2012).

2.5.3.4.4. Aproximación Mecánica para Modelar la Retracción y el Agrietamiento

Hasta aquí se tiene una relación entre la succión y la cohesión. Para modelar la retracción y el agrietamiento se necesita poner a la cohesión en función de la porosidad. Para ello se realizaron ensayos donde se midió la resistencia a tracción para distintos valores de porosidad. El resultado de estos ensayos se puede ver en la Figura 2.47. Así, la variación de porosidad está relacionada directamente con las grietas y la retracción. La porosidad se introduce como una variable interna del programa. Cuando el suelo se expande, la porosidad aumenta y la resistencia a tracción disminuye. Por el contrario, cuando en suelo se contrae sin restricciones, la cohesión aumenta debido a que los meniscos aumentan la succión. De esta forma, tanto cambios en succión como en porosidad producen cambios en la cohesión.

La relación entre la porosidad y la cohesión queda expresada de la siguiente manera:

$$c_{\phi}(\phi) = \frac{|f(\phi)| + f(\phi)}{2} \quad (2.50)$$

$$f(\phi) = 1 - \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^n \quad (2.51)$$

Dónde: ϕ es la porosidad del suelo, ϕ_0 es una porosidad de referencia y n es un parámetro material que caracteriza la forma de la función cohesión-porosidad.

Combinando ecuaciones llegamos a:

$$c(s, \phi) = c_s(s)c_{\phi}(\phi) = (As + B) \frac{|f(\phi)| + f(\phi)}{2} \quad (2.52)$$

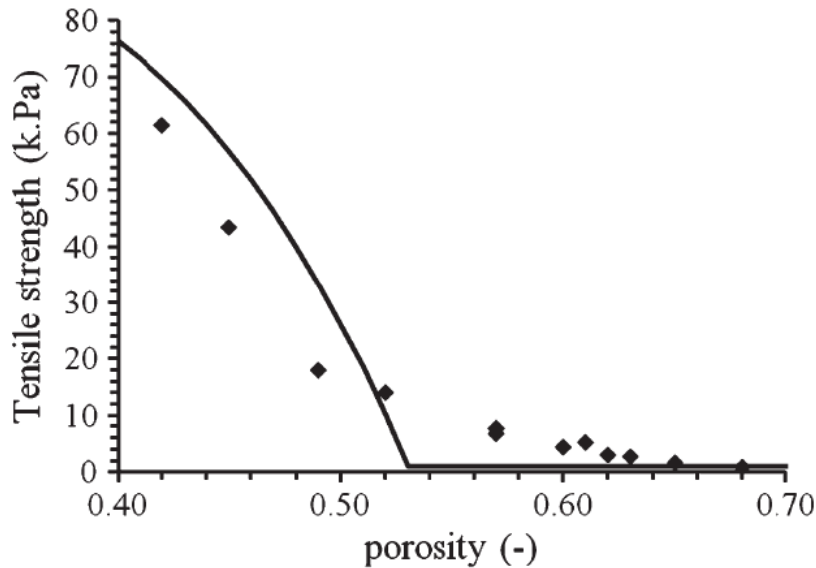


Figura 2.47 - Resistencia a tracción vs porosidad. (Trabelsi, et al., 2012).

Es decir, una expresión que pone a la cohesión en función de la succión y de la porosidad.

Para introducir estos conceptos en la formulación THM de CODE_BRIGHT se ha propuesto una aproximación elasto-visco-plástica. El modelo utiliza una función de fluencia lineal en el plano $q - p'$ (p' es la tensión total menos la de aire y se denomina tensión neta). Para calcular la deformación el modelo utiliza como variables a la tensión neta y la succión. La relación constitutiva se escribe:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon^{el}}{dt} + \frac{d\varepsilon^{in}}{dt} \quad (2.53)$$

Es decir, la deformación total es la suma de la deformación elástica más la inelástica. La componente elástica tiene términos en tensiones, en temperatura y en succión y se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{d\varepsilon^{el}}{dt} = \mathbf{C} \frac{d\sigma}{dt} - \alpha_T \mathbf{I} \frac{dT}{dt} + \alpha_s \mathbf{I} \frac{ds}{dt} \quad (2.54)$$

Dónde: \mathbf{C} es la matriz elástica, α_T es el coeficiente de expansión térmica, α_s es el coeficiente de retracción debido al aumento de succión. La deformación inelástica se calcula usando la función de fluencia (F) y el potencial (G) funciones que dependen de la tensión, succión y la deformación volumétrica (porosidad).

$$\frac{d\varepsilon^{in}}{dt} = \frac{d\varepsilon^{vp}}{dt} = \Gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (2.55)$$

Dónde: Γ es un parámetro de fluidez (inverso de la viscosidad) y Φ es una función de la tensión. Se consideraron las siguientes funciones:

$$F = Gq - Mp'c\beta \quad (2.56)$$

$$\Phi(F) = F^m \quad (2.57)$$

Dónde: q es la tensión desviadora y p' la tensión media menos la presión de aire.

Comparando este modelo con el criterio de falla de Mohr-Coulomb se obtiene:

$$M(\varphi) = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad (2.58)$$

$$\beta(\varphi) = \frac{6\cos\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad (2.59)$$

$$c = c(s, \phi) \quad (2.60)$$

Dónde: φ es el ángulo de fricción interna, el cual permite obtener los valores de M y β , m es un parámetro material.

2.5.3.4.5. Implementación Numérica para Predecir el Agrietamiento

En este artículo se propone que cuando en un elemento se alcanza la condición de agrietamiento, la viscosidad de dicho elemento disminuye, transformándolo en un elemento muy blando que prácticamente no resiste tensiones. Es una forma sencilla de implementar la fractura sin complicaciones de implementación como otras técnicas usadas en la actualidad tales como discontinuidades fuertes o bien métodos basados en partición de la unidad (partition of unit).

2.5.3.4.6. Heterogeneidad

Además del estado de tensiones de la muestra, se ha visto que el agrietamiento se produce debido a la heterogeneidad que presenta toda muestra de suelo. Así, zonas más débiles tienden a agrietar con mayor facilidad. Para incluir este hecho en el modelo se introduce una variación aleatoria de la porosidad a partir de la porosidad media medida para una determinada muestra. Dicha variación se ha tomado igual al 10% a partir de la media mencionada. Heterogeneidad en la porosidad se traduce en heterogeneidad en la cohesión y en la resistencia a tracción.

2.5.3.4.7. Resultado de las Simulaciones y Comparación con los Experimentos

Las simulaciones son en 2D. Se aplica el perfil de succión mostrado en la Figura 2.45. Se estudia el efecto del tipo y tamaño del elemento. Se introduce la heterogeneidad. Se comparan tanto los ángulos de bifurcación de las grietas como los patrones numéricos y experimentales.

En cuanto al tipo de elemento, comparando elementos triangulares y cuadrangulares, se observa que los elementos triangulares dan una mejor aproximación en cuanto a su similitud con la realidad. Cuando más grandes los elementos mayor es la diferencia entre simulación y realidad. En general las simulaciones no logran el grado de conectividad de las grietas reales.

2.5.3.4.8. Evolución de la Porosidad, Deformación Plástica y Tensiones en el Medio Sano y Agrietado.

En la Figura 2.48 y Figura 2.49 se observan los resultados obtenidos con el programa. En la Figura 2.45 se observan los valores de succión impuestos para la simulación, el momento de iniciación de las grietas y el final de su propagación.

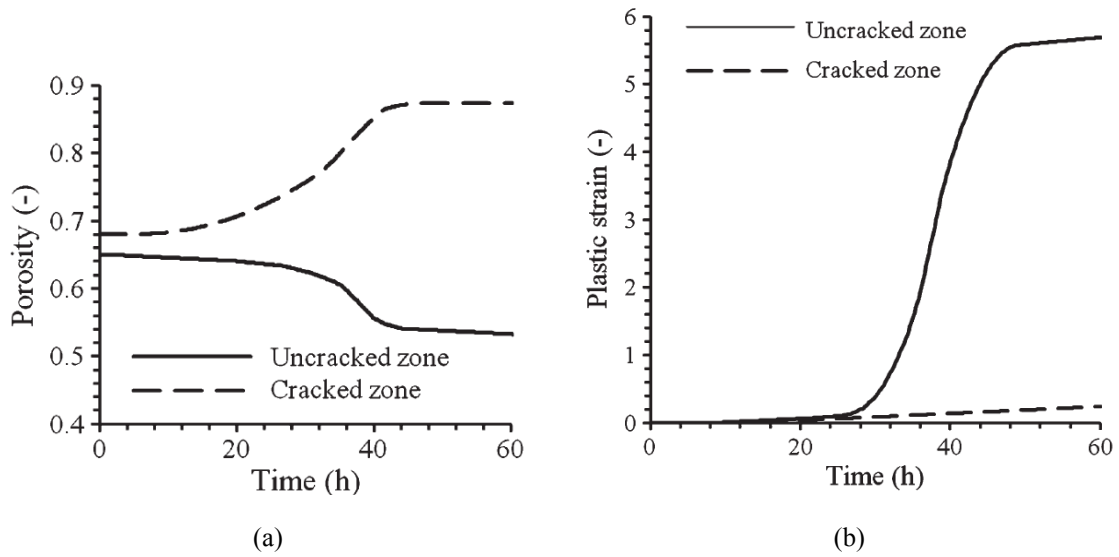


Figura 2.48 – Resultados de la simulación: a) Evolución de la porosidad con el tiempo; b) Evolución de la deformación plástica (Trabelsi, et al., 2012)

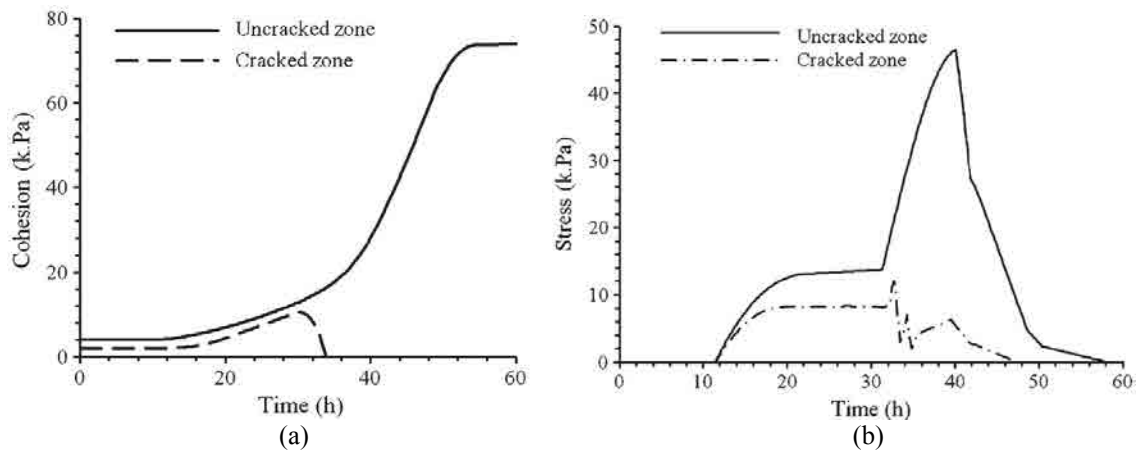


Figura 2.49 – Resultados de la simulación: a) Evolución de la cohesión con el tiempo; b) Evolución de la tensión de tracción (Trabelsi, et al., 2012).

La porosidad aumenta dramáticamente en las zonas con grietas y disminuye en las zonas sin grietas bajo retracción. Las deformaciones son elásticas para valores bajos de succión y a largo plazo las deformaciones bajo valores importantes de succión son inelásticas.

Se puede observar como la cohesión cae estrepitosamente en la zona de grietas. La tensión de tracción baja bruscamente en la zona de grietas y en las zonas sin grietas aumenta hasta un cierto pico y finalmente disminuye cuando la muestra presenta un patrón de grietas generalizado.

2.5.4. Método del Elemento Distinto (UDEC)

El trabajo de Amarasiri, et al. (2011), presenta una alternativa de análisis de problemas de agrietamiento en suelos. El objetivo del artículo es simular experimentos de laboratorio efectuados en un trabajo anterior de Nahlawi & Kodikara (2006). Los resultados de dicho trabajo se pueden ver en detalle en el Capítulo 5 de esta tesis. En este trabajo se utiliza el código comercial UDEC de Itasca. Se han implementado ciertas características necesarias utilizando el lenguaje propio del programa llamado FISH.

Hay una serie de procesos no lineales durante la desecación en suelos. Aumento de la succión debido a fenómenos capilares, incremento del módulo de Young y del módulo de corte con la succión, cambios en la resistencia a la tracción y la tenacidad de fractura y finalmente cambios en la adherencia en las interfaces.

2.5.4.1. Descripción del Método del Elemento Distinto

El programa UDEC es un programa basado en el Método del Elemento Distinto (Distinct Element Method), usada ampliamente en mecánica de rocas. Este programa modela el continuo usando triángulos de diferencias finitas de deformación constante. Es un programa explícito que resuelve el problema mecánico.

Este método puede simular agrietamiento y formación de nuevos contactos. Una de sus limitaciones es que solo puede calcular flujo de fluido a través de sus juntas y no a través del medio. Para utilizarlo hay que conocer la variación del contenido de humedad con el tiempo.

2.5.4.2. Características y Parámetros del Modelo UDEC

Las propiedades que hay que introducir en el programa son: resistencia a tracción, módulo de corte, modulo volumétrico y succión del suelo. Además, resistencia al corte y rigidez al corte de la interface suelo-base de apoyo.

Todas las propiedades del material se introducen como funciones del contenido de humedad. Esto fue posible mediante el uso del lenguaje FISH que permite establecer estas relaciones dentro del código del programa. El material se consideró elástico no lineal.

Las juntas asignadas para simular el test 1, se muestra en la Figura 2.50. La base se consideró de 2 mm de espesor. La interface entre la base y los laterales verticales son potenciales puntos donde aparecerán grietas. El suelo se consideró formado por dos capas con valores distintos del coeficiente de desecación k y separadas por una junta horizontal.

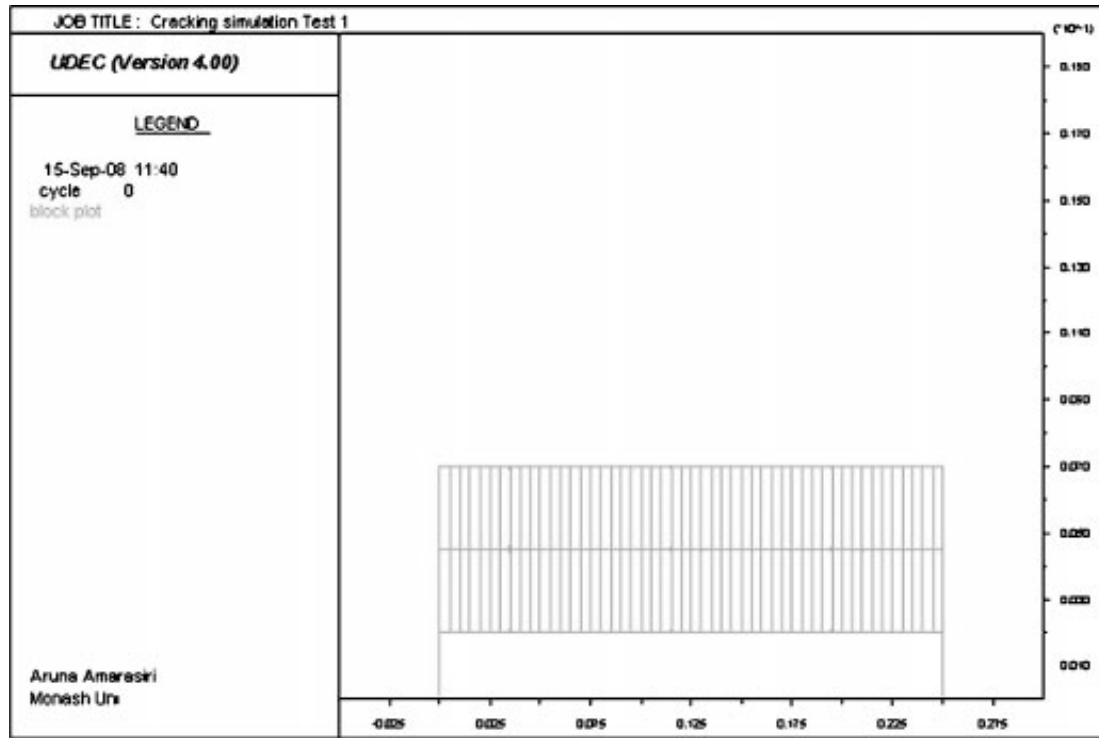


Figura 2.50 - Juntas asignadas al modelo para el Test 1. (Amarasiri, et al., 2011).

2.5.4.3. Simulación de Dsecación, Succión y Desarrollo de Resistencia

La tasa de dsecación viene dada por la siguiente expresión:

$$w - w_r = (w_i - w_r)e^{-kt} \quad (2.61)$$

Y consecuentemente:

$$\frac{dw}{dt} = -k(w - w_r) \quad (2.62)$$

Donde, w_i es el contenido de agua inicial, w_r es el contenido de agua residual, y k es el coeficiente de dsecación con dimensión $[T]^{-1}$. Los valores de k que mejor ajustan las curvas de perdida de humedad con el tiempo son de (Nahlawi & Kodikara, 2006) y se usan en este trabajo. El incremento de succión debido a perdida de humedad está establecido mediante la curva de retención que puede verse en la Figura 2.51.

La succión $\psi(kPa)$, en función del contenido de humedad se expresa mediante:

$$\psi = \exp[(136.5 - w)/9.92] \quad (2.63)$$

La rigidez se incrementa con la succión según (Kodikara & Choi, 2006) para la arcilla de Werribee:

$$H = 24\psi^{0.95} \quad (2.64)$$

Donde $H(kPa)$ es el modulo respecto de la succión.

El módulo de Young según (Fredlund & Rahardjo, 1993) se expresa:

$$E = H(1 - 2\nu) \quad (2.65)$$

Donde $\nu = 0.42$ es el coeficiente de Poisson.

Basados en ensayos de laboratorio, Figura 2.52a, se utiliza la siguiente relación experimental para calcular la resistencia a tracción $T(kPa)$ en función del contenido de humedad $w(\%)$:

$$T = 149,194w^{-2.3744} \quad (2.66)$$

2.5.4.4. Características de la Interface Suelo-Molde

En la Figura 2.52b, se observan los resultados de ensayos que determinaron la resistencia al cortante en función del contenido de humedad para la arcilla de Werribee (Nahlawi, 2004). Para aproximar estos resultados se utiliza la expresión de Bézier:

$$C = \beta_1(1 - u)^4 + \beta_2 \quad (2.67)$$

Donde

$$u = (w - 5)/\beta_3 \quad (2.68)$$

2.5.4.5. Resultados con UDEC

El modelo propuesto intenta reproducir ensayos de laboratorio. En la Figura 2.51 se presenta la curva de retención de la arcilla de Werribee. En la Figura 2.52 se presentan la resistencia a tracción y la resistencia al corte de la arcilla en función de la humedad. En cuanto a número de grietas, los resultados numéricos contrastados con el laboratorio se presentan en la Figura 2.53. La altura al final de las simulaciones fueron en general un poco menores. La apertura de las grietas son un poco menores que en los ensayos. El modelo predice además algo de arqueado en las muestras. El modelo reproduce algunas de las características del proceso de desecación y agrietamiento del suelo.

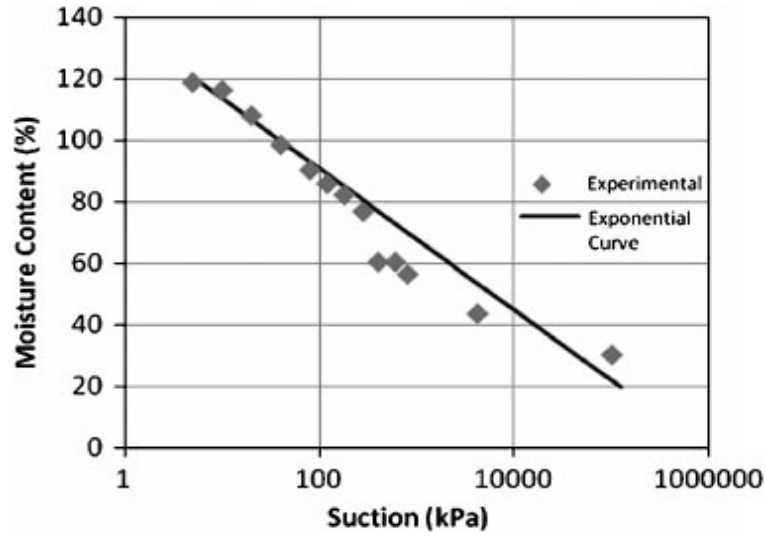


Figura 2.51 - Curva de retención de la arcilla de Werribee. (Amarasiri, et al., 2011)

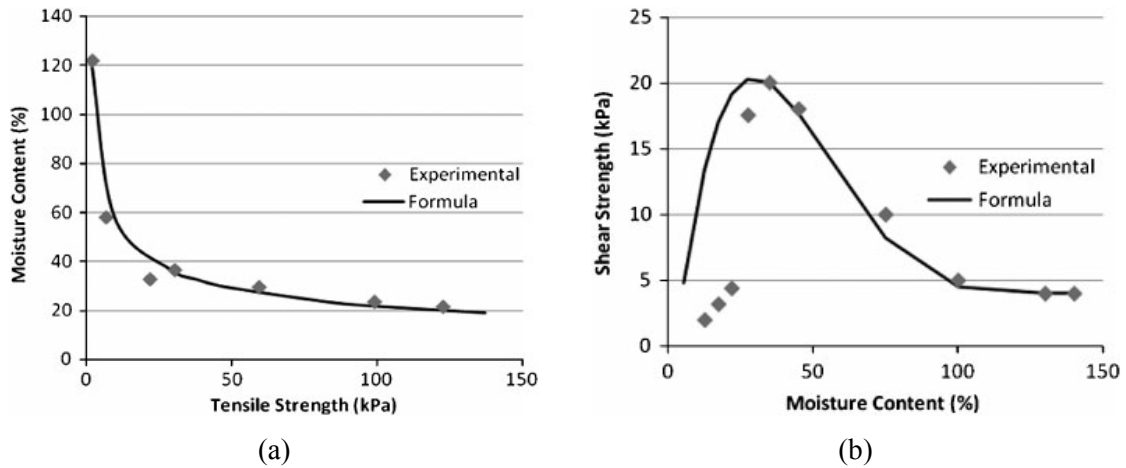


Figura 2.52 – Resistencia a tracción y al corte: a) Variación de la resistencia a tracción con el contenido de humedad; b) Resistencia al corte en la interface (Amarasiri, et al., 2011).

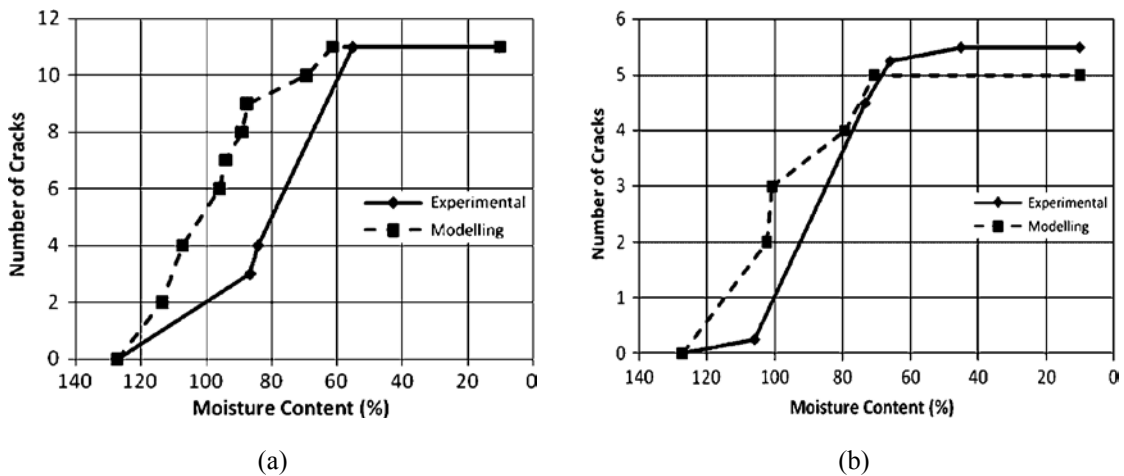


Figura 2.53 – Comparación de los resultados numéricos y de laboratorio: a) Evolución de grietas ensayo 3; b) Evolución de grietas ensayo 5 (Amarasiri, et al., 2011)

2.5.5. Método del Elemento Discreto (DEM)

El propósito del artículo de Sima, et al. (2013), es mostrar la capacidad del Método de los Elementos Discretos (Discrete Element Method, DEM) para simular la desecación, inicio y propagación de grietas de ensayos de laboratorio sobre muestras circulares delgadas en recipientes de vidrio. Se utilizó el programa PFC3D de la empresa Itasca (Itasca, 2003) para simular el proceso y se tuvo en cuenta la variación de la rigidez y la resistencia a tracción en función del contenido de humedad.

2.5.5.1. Modelo de Retracción para la Arcilla de Sima et al. (2013)

Se considera que las partículas son esferas de diversos tamaños unidas mediante una ley de interacción. Para simular la retracción se supone que las esferas reducen su radio en función del tiempo mediante la siguiente ecuación:

$$R = R_0 \exp\left(-\alpha \frac{t}{\tau}\right) \quad (2.69)$$

Donde R_0 es el radio en el tiempo $t = 0$, α es un parámetro material, y τ es la duración total del ensayo.

La ley es idéntica para todas las esferas, en pequeñas deformaciones, la deformación volumétrica ε_v a nivel macroscópico será:

$$\varepsilon_v = 1 - \exp\left(-3\alpha \frac{t}{\tau}\right) \quad (2.70)$$

El parámetro α se puede determinar experimentalmente de la curva $\varepsilon_v - t$.

Mientras el grado de saturación es igual al 100%, la disminución de volumen se corresponde con la pérdida de agua, entonces el parámetro α es constante y se puede calcular con:

$$\alpha = -\frac{1}{3} \ln\left(1 - \frac{w_0 - w_f}{1 + e_0} G_s\right) \quad (2.71)$$

Donde w_0 es el contenido de agua al inicio de la simulación, e_0 es la correspondiente relación de vacíos, w_f es el contenido de agua al final del ensayo para $(t = \tau)$, y G_s es la densidad relativa de las partículas de suelo. Para capturar la variación de las propiedades del material durante la desecación hay que definir funciones de la rigidez en los contactos y resistencia de adherencia entre partículas en función del contenido de agua o succión.

La resistencia a tracción σ_t de la arcilla en función del contenido de agua w se fijó con la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = 3729 * \exp\left(-\frac{w}{12}\right) - 25.21 \quad (2.72)$$

2.5.5.2. Experimento de Laboratorio Utilizado

Como referencia y para calibrar el modelo, se utilizó el trabajo de (Tang C.S., 2011). Se trata de ensayos en una delgada capa de suelo (Romainville Clay) en una bandeja de vidrio de 117 mm de diámetro y unos 8 mm de altura. El contenido de agua inicial fue de 115%. El límite líquido $w_L = 77\%$, el límite plástico $w_P = 40\%$, el índice plástico $IP = 37$ y la superficie específica $340 \text{ m}^2/\text{g}$. La muestra se secó en cámara ambiental con temperatura y humedad controladas.

La curva de retención fue aproximada mediante:

$$\ln\Psi = a + b \cdot \ln\theta_w \quad (2.73)$$

Donde ψ es la succión en MPa, θ_w es el contenido volumétrico de agua en %, $a = 6.263$ y $b = -0.1052$.

Los cambios en contenido de agua y tasa de evaporación obtenidos en el laboratorio se muestran en la Figura 2.54.

2.5.5.3. Modelo usando DEM y PFC3D

Se utilizaron 24,591 esferas y 143,811 contactos. El radio de los granos vario entre 0.89 – 1.39 mm. Se utilizó método de compactación multicapa para generar un paquete homogéneo. El aspecto final de la muestra desecada y el modelo utilizado en DEM se muestran en la Figura 2.55. El proceso de simulación se dividió en 3 etapas. La primera cambio el contenido de agua de 60% a 17% (valor de entrada de aire), y la muestra se consideró en condición saturada con $\alpha = 0.198$. La segunda etapa, de 17% a 11% en contenido de agua (Límite de Retracción), la muestra en estado parcialmente saturada con $\alpha = 0.015$. La última etapa contenido de agua menor a 11% con $\alpha = 0$. Se consideró una desecación homogénea adoptando la misma ley de evolución con el tiempo para todas las partículas.

La resistencia a tracción inter-granular normal f_n (N) fue puesta en función del contenido de agua w :

$$f_n = 14.916 \times \exp\left(-\frac{w}{12}\right) - 0.101 \quad (2.74)$$

La rigidez de los contactos en la dirección normal k_n (N/m) en función del contenido de agua w :

$$k_n = 1.25 \times 10^7 \times \exp(-0.197w) \quad (2.75)$$

La resistencia de la unión entre partículas y la rigidez en sus contactos se establecieron mediante la resistencia a tracción del suelo y de su módulo de elasticidad. Se consideró que la resistencia a tracción inter-granular tangencial es igual a la normal $f_s = f_n$ y que la rigidez tangencial en los contactos es igual a la rigidez normal $k_s = k_n$.

Las condiciones de contorno fueron: desplazamientos nulos en la base y en los laterales de la muestra. Desplazamientos libres en la superficie superior. La interface entre partículas y molde en la base se modeló mediante una junta. La rigidez del contacto y la resistencia a tracción entre partículas y junta se adoptó de 10% y 50% de la considerada para el suelo.

2.5.5.4. Comparación de Resultados Numéricos y Experimentales

En la Tabla 2.4 se presentan los resultados experimentales de (Tang C.S., 2011) y los resultados numéricos del presente artículo.

Respecto de los resultados numéricos los autores hablan de tres etapas. La primera es la aparición de las primeras grietas hasta las primeras intersecciones entre ellas. La segunda etapa donde grietas secundarias dividen los bloques formados por las grietas primarias de la etapa anterior. En la tercera etapa la geometría se estabiliza y no se forman nuevas grietas.

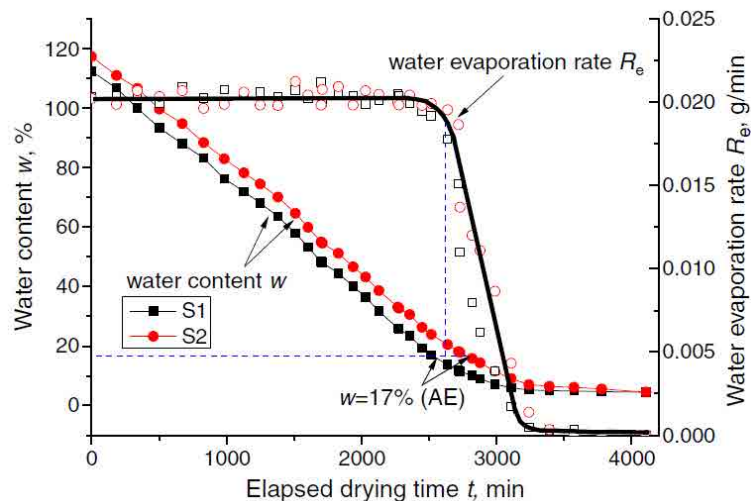


Figura 2.54 - Cambios de contenido de humedad y tasa de evaporación en ensayo de desecación. (Sima, et al., 2013)

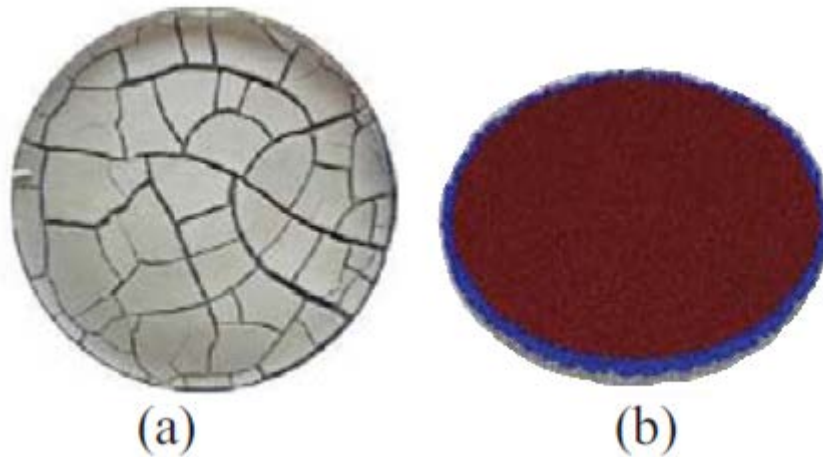


Figura 2.55 – Ensayo y modelo: a) *Aspecto final de la muestra luego de la desecación*; b) *Modelo en DEM* (Sima, et al., 2013).

Tabla 2.4 - Resultados experimentales y numéricos. (Sima, et al., 2013).

	Ensayo	DEM
Tasa de superficies de grietas R_{sc} %	14.2-14.4	15.1
Longitud de grieta por unidad de área L_{pa} (cm^{-1})	1.15	1.32
Apertura promedio de grieta W_{av} (mm)	1.23	1.17
Contenido de agua al agrietarse w_c (%)	40-42	41.5

El patrón final de agrietamiento está formado por polígonos irregulares. Las intersecciones a 90° son predominantes pero también existen intersecciones a 135° en coincidencia con los resultados de laboratorio.

Mediante un análisis de imágenes de los resultados de laboratorio y las figuras de los resultados numéricos, se establecieron parámetros geométricos para cuantificar el patrón de grietas: la tasa de superficies de grietas R_{sc} %, la longitud de grieta por unidad de área L_{pa} (cm^{-1}), y la apertura promedio de grieta W_{av} (mm).

En la Figura 2.56 se comparan los resultados experimentales y numéricos respecto de los parámetros mencionados arriba y respecto del contenido de agua al agrietarse el suelo. Se observa una correspondencia aceptable.

En la Figura 2.57 se observa nuevamente una comparación entre resultados experimentales y numéricos esta vez en (a) los cambios en la tasa de superficie de grietas y en (b) la longitud por unidad de área de grietas en función del contenido de agua w (%). En ambos casos se observa una estabilización al llegar al final del proceso. El modelo captura cualitativamente el proceso de desecación.

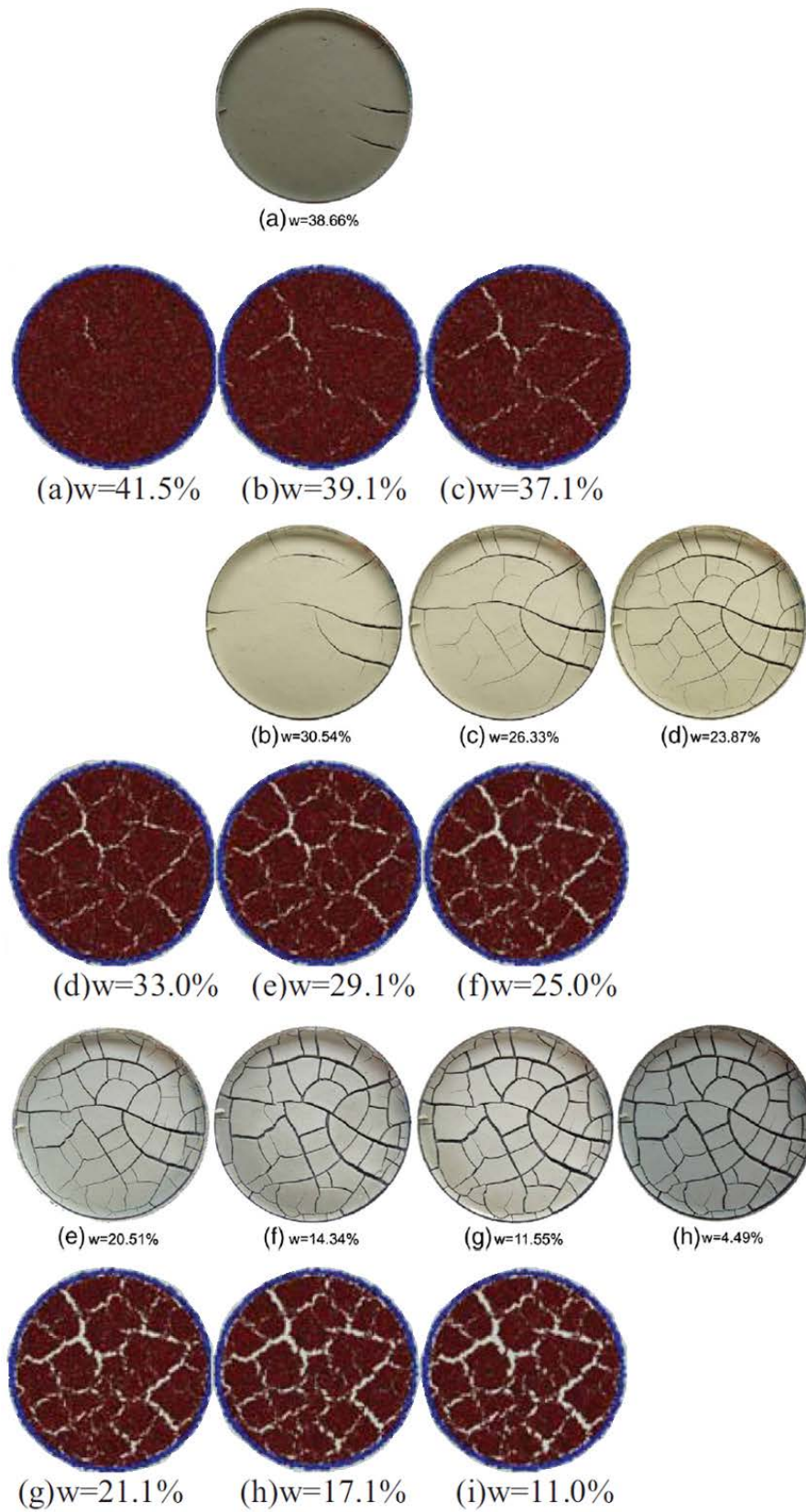


Figura 2.56 - Resultados experimentales (Tang C.S., 2011) y numéricos (Sima, et al., 2013).

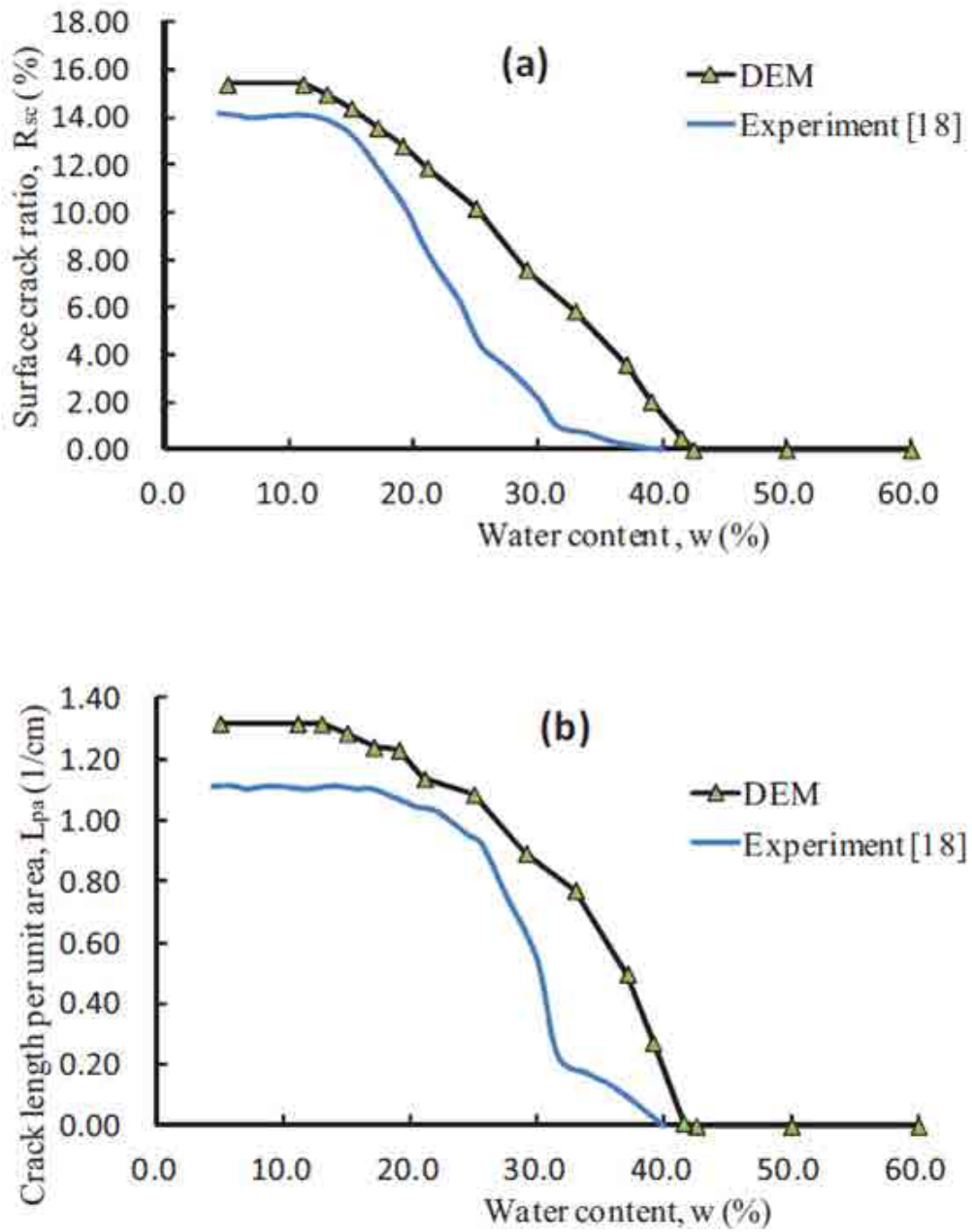


Figura 2.57 – Comparación de resultados experimentales con los resultados del modelo: a) Cambios en la tasa de superficie de grietas; b) Cambios en la longitud por unidad de área (Sima, et al., 2013).

2.6. Conclusiones del Estado del Arte

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas a partir del estado del arte previamente presentado. Se distinguen las tres vertientes estudiadas y se enumeran los principales conceptos extraídos de la bibliografía.

2.6.1. Conclusiones de la Vertiente Experimental

La revisión bibliográfica de casi 100 años de investigación en el campo de la desecación permite establecer que el fenómeno que se estudia está compuesto en realidad por más de un proceso. Sin duda, la desecación (*proceso hidráulico*) produce una pérdida de humedad en el suelo que va seguida de retracción (*proceso mecánico*). En el laboratorio se ha podido observar que la retracción no implica necesariamente agrietamiento, como en el caso del arqueo en pequeñas porciones de suelo (Nahlawi & Kodikara, 2002). Luego, cuando hay agrietamiento este puede ir acoplado de arqueo en las porciones que queda dividida la muestra (Lakshmikantha, 2009). Estamos en presencia por lo tanto de *tres procesos diferenciados*: un proceso hidráulico, la desecación y dos procesos mecánicos, la retracción y el agrietamiento.

Los ensayos de campo son más directos, hay más variables pero no se introducen efectos de bandejas como en el laboratorio, además, son más costosos y no hay control de variables medioambientales, la naturaleza las impone a voluntad y solo se pueden instrumentar.

2.6.1.1. Objetivo de las Investigaciones

A lo largo del tiempo también se han ido definiendo los objetivos de la investigación en este campo. El hecho de intentar predecir los patrones de agrietamiento o cuantificar la deformación durante la retracción, lleva a la necesidad de comprender los mecanismos del fenómeno. Desde un punto de vista práctico interesa cuantificar la deformación producida por la retracción debida a la desecación. Además, cuando hay agrietamiento interesa cuantificar la longitud, profundidad y separación de las grietas así como su evolución temporal durante el proceso de secado. Con esto se estaría en condiciones de predecir los cambios drásticos en permeabilidad del suelo y en capacidad resistente, lo cual es muy complejo pero de suma utilidad práctica.

2.6.1.2. Tipos de Suelo que Presentan Retracción y Agrietamiento por Desecación

Como se ha visto en este Estado del Arte, el proceso de desecación seguido de retracción y agrietamiento es propio de suelos arcillosos o limo-arcillosos. También, los residuos mineros y algunos materiales orgánicos como el almidón de patata presentan tendencia al agrietamiento

por secado. Se ha visto que la fábrica y los defectos del suelo tienen influencia en los patrones de agrietamiento y en el comportamiento general cuando se deforma por pérdida de humedad. Por ser un material natural y granular, la caracterización de la estructura del suelo es compleja.

2.6.1.3. Fenómenos que Producen Agrietamiento

El agrietamiento se produce principalmente por la restricción de la retracción debido a secado, pero también por sinéresis, coalescencia o evapotranspiración. Las grietas por Sinéresis, se deben a la retracción del lodo saturado por diferencias en la salinidad o debido a ciertas condiciones químicas. Se distinguen de las grietas por desecación por ser discontinuas y sinuosas. La coalescencia es la unión de dos fases menores en una mayor y única debida a fuerzas inter-partículas que buscan una configuración de mínima energía. La evapotranspiración es el consumo de agua de las plantas por medio de sus raíces. Al extraer agua las plantas pueden producir desecación y agrietamiento del suelo. La explotación de agua para consumo deprime el nivel freático lo cual puede producir agrietamiento en la superficie del terreno.

2.6.1.4. Características de las Grietas

Se ha visto que las dimensiones de las grietas son muy variables. La apertura o la profundidad de las grietas pueden variar desde unos pocos milímetros al orden de metros.

En el laboratorio se han clasificado a las grietas en primarias, secundarias, terciarias, etc. según el instante de su aparición. Esto se conoce como patrón jerárquico de la grieta.

También se han clasificado en ortogonales y secuenciales (que son las más comunes) o bien en hexagonales y simultáneas que son la excepción. Los polígonos que quedan definidos luego del agrietamiento presentan 4, 5 o 7 lados en la mayoría de los casos y 6 en los casos excepcionales de grietas hexagonales.

2.6.1.5. Factores que Influyen en el Proceso

Se ha visto que los factores que influyen en el proceso de desecación y agrietamiento son el tamaño y forma de la muestra, condiciones de contorno que imponen las bandejas, tenacidad a la fractura, resistencia a tracción del suelo y su dependencia respecto del contenido de humedad. La adherencia entre suelo y bandeja tiene gran influencia en las restricciones que se imponen al suelo durante el secado y es una característica poco estudiada. El contenido de agua en la muestra, sobre todo la velocidad de evaporación durante el proceso y el contenido inicial de agua influyen en el proceso y en el resultado final.

Se han clasificado los factores que influyen en la desecación (Corte & Higashi, 1960), en:

Factores Extrínsecos: temperatura y humedad relativa del ambiente, ubicación del nivel freático. Estas variables modifican la succión en el interior de la masa de suelo y esta última es la variable fundamental que gobierna los procesos de *dsecación, retracción y agrietamiento*.

Factores Intrínsecos: el tamaño de la muestra (incluida su altura), rugosidad de la bandeja contenedora, material de la bandeja, contenido de agua al agrietarse, velocidad de secado, resistencia a tracción y su dependencia con el contenido de agua, tenacidad a la fractura y su variación con el contenido de humedad.

2.6.1.6. Características Fundamentales del Agrietamiento

La deformación vertical suele ser mayor que la horizontal (longitudinal y transversal) en ensayos realizados en bandejas circulares y rectangulares (Corte & Higashi, 1960).

En los primeros momentos hay una deformación debido al re-arreglo de las partículas manteniendo el estado saturado. Posteriormente, hay un proceso de desecación con desaturación de los poroso y deformación y finalmente una etapa de desecación prácticamente sin deformación (Bronswijk, 1988).

A menor espesor las grietas son más próximas debido a que la energía de fractura es directamente proporcional a la superficie de la grieta.

2.6.1.7. Causas de la Formación de Grietas

Aunque la principal causa de agrietamiento parece ser debida a las restricciones de deformación, la heterogeneidad del suelo, la cual produce perfiles de succión no uniformes, también puede determinar la aparición de grietas durante el secado. La sinéresis y la coalescencia pueden ser también la causa de formación de grietas.

2.6.1.8. Resistencia a Tracción

La resistencia a tracción del suelo tiene un valor significativo y varia con el contenido de humedad del suelo. Además, resulta ser una propiedad fundamental para el estudio del agrietamiento.

2.6.2. Conclusiones de la Vertiente Teórica

Los primeros intentos por comprender y establecer una teoría para resolver el problema de agrietamiento fueron considerando al medio elástico. Si bien esta teoría permite calcular profundidad y separación de grietas en 2D, considerando un espacio semi-infinito, las grietas así calculadas son todas iguales e igualmente espaciadas. Además, no es posible distinguir en general grietas de tipo primario, secundario, terciario, etc.

En el desarrollo de teorías se ve la tendencia hacia el uso de teorías que acoplan el problema de flujo saturado y no saturado de agua durante la retracción por desecación y las teorías de fractura para el agrietamiento.

Se observa además, que el eminente carácter tridimensional del proceso condiciona al estudio en tres dimensiones, si se quiere comprender y predecir el fenómeno. De todas formas, estudios en bidimensionales y unidimensionales son útiles para comprender al menos parcialmente el problema.

Se ha establecido desde temprano que las variables que producen desecación son ambientales y básicamente se reducen a la temperatura y humedad relativa del ambiente en el laboratorio. En el campo influye la radiación solar, el viento y los cambios en el nivel freático. También está claro que la variable fundamental que gobierna el comportamiento de la masa de suelo en desecación es la succión, aunque no es la única variable a tener en cuenta, puesto que existen otros fenómenos que afectan al desarrollo del proceso. Se sospecha que durante la desecación puede haber coalescencia y sinéresis además de evaporación y flujo de humedad, aunque esto aún no se ha podido demostrar.

Cuando hablamos de problemas de desecación donde puede haber agrietamiento, existen ciertos factores que inducen a la formación de fisuras. Se pueden clasificar a esos factores en tres grandes grupos (Hueckel, 1992): a) condiciones de contorno; b) concentración de tensiones; c) heterogeneidad, textura y estructuran del suelo.

En el laboratorio, las condiciones de contorno están relacionadas con la adherencia y rugosidad de las bandejas contenedoras. La concentración de tensiones se da en los defectos o grietas pre-existentes. La heterogeneidad, textura y estructura dependen de la forma de preparación de la muestra. En el campo esto último depende de la fábrica del suelo.

No existe a la fecha una teoría que integre todas las características del fenómeno. Lograr incluir todas las características y factores que influyen es muy complejo puesto que son muchas e interactúan entre sí.

2.6.3. Conclusiones de la Vertiente Numérica

Del análisis de la literatura y de actual investigación en el campo de la desecación en suelos, desde un punto de vista numérico, queda claro que el problema puede resumirse en dos grandes apartados. El primero corresponde a la simulación numérica de la retracción del suelo y en algunos casos el arqueamiento, debido al flujo de agua en el medio poroso deformable. El segundo, corresponde al estudio del agrietamiento, inicio de una fisura y su propagación, para lo cual es necesario evaluar la resistencia a tracción en función del grado de saturación y la tenacidad a la fractura para poder calcular la propagación de las grietas usando la MF.

Debido a la complejidad de resolver estos dos problemas acoplados, distintos autores han propuesto alternativas simplificadas utilizando tanto códigos comerciales como códigos académicos. Estos códigos a su vez utilizan diversos métodos para aproximar el problema resolviendo las ecuaciones diferenciales que lo describen.

El MDF, se ha visto utilizado mediante el código comercial FLAC. Este programa no está pensado para el problema de flujo en medio poroso ni para el problema del agrietamiento, es un código que resuelve el problema mecánico. Por este motivo, solo se ha podido adaptar para el análisis del arqueamiento. El MEF, se ha visto utilizado mediante el Code_Bright, es un método muy adaptable y que permite implementar el problema utilizando las teorías más tradicionales en Geotecnia. El Método del Elemento Distinto, se ha visto utilizado en el programa UDEC, de la empresa Itasca, resuelve el problema mecánico. El Método del Elemento Discreto, DEM, ha sido utilizado tanto en códigos comerciales como el PFC3D u otros de índole académica. Es un método versátil y relativamente nuevo que está ganando terreno en todos los campos. Es versátil porque permite manipular las ecuaciones de las partículas de manera sencilla. Sin embargo, utiliza conceptos que se alejan de los tradicionales planteos teóricos en la Ingeniería Geotécnica.

"La experimentación es el método común de las ciencias experimentales y las tecnologías que consiste en el estudio de un fenómeno, reproducido generalmente en un laboratorio, en las condiciones particulares de estudio que interesan, eliminando o introduciendo aquellas variables que puedan influir en él".

Wikipedia

Capítulo 3

Análisis Experimental

El proceso de desecación en suelos incluye procesos físicos, químicos, hidráulicos y mecánicos. Los patrones de grietas son únicos para cada ensayo y su desarrollo depende de varios factores que pueden ser intrínsecos (*fábrica: heterogeneidad, tamaño de las partículas, estructura y defectos; contenido de agua inicial; etc.*) o extrínsecos (*restricciones: rugosidad de la bandeja contenedora, forma de la muestra, sinéresis, coalescencia, etc.*).

Desde el punto de vista experimental, diversos autores han estudiado este proceso desde principios del siglo XX y se han hecho aportes importantes desde hace más de medio siglo (Corte & Higashi, 1960; Lau, 1987; Ávila, 2004; Nahlawi & Kodikara, 2006; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, 2009) y muchos otros.

Partiendo de resultados anteriores obtenidos en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, (Lloret, et al., 1998; Rodríguez, et al., 2007; Lakshmikantha, 2009; Prat, et al., 2013), se ha continuado con la campaña de laboratorio de la línea de investigación de grietas por desecación.

En la vertiente experimental se propuso, previamente a esta tesis, construir una Cámara Ambiental (CA), donde se puedan generar oscilaciones de humedad relativa y temperatura ambientales y se puedan observar sus influencias sobre muestras de suelo arcilloso de distintos tamaños, instrumentadas con sensores de masa, temperatura, humedad y succión. El trabajo experimental anterior a esta tesis incluyó algunos ensayos de caracterización. Así, por ejemplo, se obtuvieron la resistencia a tracción en función de la humedad o de la succión y por otro lado, la tenacidad o energía crítica de fractura.

Para esta Tesis Doctoral se han llevado a cabo diversos experimentos, presentados en este Capítulo, buscando comprender el fenómeno físico de la desecación y se ha avanzado por primera vez en el estudio de ciclos que incluyen además de desecación, humedecimiento e inundación.

En el capítulo anterior, se ha visto que al día de hoy existe cierta metodología de trabajo y cierta tendencia a estudiar determinados procesos que se consideran relevantes en el estudio del agrietamiento por desecación (estudio de muestras en bandejas rectangulares y circulares más o menos instrumentadas).

En este capítulo, se presenta en primer lugar, la utilización de un equipo de Georadar (Ground Penetrating Radar System - GPR), una novedad en este campo de estudio, para la auscultación del suelo y de las grietas por desecación.

Por lo expuesto en el Capítulo 2 Estado del Arte, se llega a la conclusión de que es bueno clasificar a las restricciones en externas como lo es la adherencia con la bandeja y restricciones internas que tienen que ver con la heterogeneidad del suelo y su composición granular.

Los ensayos en bandejas de suelo rectangulares de pequeño espesor son clásicos en el estudio de las grietas por desecación en suelos. Estudiando este tipo de bandejas se ha podido comprobar el efecto del tamaño que presentan estos fenómenos (Lakshmikantha, 2009). Los primeros ensayos en bandejas rectangulares aparecen en el informe de Corte & Higashi (1960). Existen sin embargo muchas variantes que buscan quitar complejidad al problema. Así, se puede trabajar con bandejas muy largas y estrechas (Nahlawi & Kodikara, 2006). Se puede jugar con la adherencia entre bandejas y suelo para obtener resultados diferentes en términos de deformación como es el caso del arqueo (Nahlawi & Kodikara, 2002). Se puede mantener la relación de lados de las bandejas rectangulares o bien cómo se hace en este capítulo estudiar la influencia de cambiar dicha relación de lados. En trabajos anteriores en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC (Lakshmikantha, 2009), se ha utilizado el mismo material, asegurando un tamaño máximo de grano de 2 mm. Cambiando este tamaño máximo de grano se han obtenido nuevos resultados que ayudan a ver la variabilidad que tiene el comportamiento según se cambien las condiciones iniciales.

En este trabajo, se estudia la influencia del tamaño máximo de partícula utilizada en la preparación de la muestra comparando tamaños máximos de partículas de 0.42 y 0.104 mm y la influencia de la relación de lados de las muestras subdividiendo bandejas rectangulares de 0.25 m² mediante divisorias de madera y PVC.

Se presenta el estudio de la influencia del secado rápido en una muestra circular de suelo, la cual presenta una configuración de agrietamiento particular y demuestra la necesidad de incluir el estudio de la influencia de la temperatura en este tipo de procesos.

En este capítulo, se presentan además los resultados de un ensayo en bandeja circular de gran espesor (10 cm) secada en CA con control exhaustivo de temperatura y humedad relativa del ambiente. Este ensayo ha sido instrumentado con tensiómetros T5X para medir la succión y sensores Decagon para medir la temperatura del suelo. También se ha auscultado la muestra con el sistema de GPR durante el proceso de desecación y humedecimiento, demostrando la versatilidad de este equipo.

En todos los casos, el suelo utilizado para los ensayos es la arcilla roja de Barcelona. Este suelo proviene del Campus Nord de la UPC, en Barcelona, extraído de una zona de obras detrás del edificio NEXUS-II a una profundidad de aproximadamente 4 m.

Este material se ha caracterizado y estudiado repetidamente en trabajos anteriores (Barrera, 2002; Lakshmikantha, et al., 2006; Lakshmikantha, 2009). Así, se conocen bien su origen geológico y su composición mineralógica. También se ha estudiado minuciosamente su comportamiento hidromecánico (Barrera, 2002). Una compilación de dichos estudios se puede ver en el Capítulo 3 de la tesis doctoral de Lakshmikantha (2009). Resumidamente, se trata de una arcilla de baja plasticidad que presenta agrietamiento bajo desecación.

3.1. Georadar. Fundamentos del Sistema.

El GPR es una técnica no destructiva de auscultación que utiliza pulsos electromagnéticos para detectar superficies reflectantes en el interior del medio que permite detectar objetos enterrados, estratigrafía y otras características del suelo a poca profundidad, proporcionando perfiles continuos en tiempo real del interior del terreno. Por lo general, el equipo consiste en un sistema informatizado de control conectado a las antenas que se mueven lentamente a lo largo de la superficie en estudio para producir un perfil del subsuelo continuo. Una antena emite los pulsos electromagnéticos y una segunda antena recibe la señal reflejada por los objetos o discontinuidades en el interior del suelo.

La onda reflejada se origina a partir de los cambios en las propiedades electromagnéticas del suelo que pueden ser causados por las variaciones en contenido de agua, cambios de densidad debido a la presencia de superficies y discontinuidades estratigráficas, o huecos existentes en la trayectoria del pulso. Por lo tanto, el éxito de la técnica para detectar fisuras depende en gran medida de un contraste dieléctrico suficiente en la ubicación de la grieta para producir una señal reflejada clara. La profundidad de penetración de los pulsos, y la resolución de los datos, dependen de la longitud de onda y la constante dieléctrica del suelo. Estos parámetros vienen controlados principalmente por el contenido de humedad del suelo. La profundidad y la resolución son

magnitudes inversamente proporcionales. Ante un aumento de la frecuencia de la antena se obtiene una mejor resolución, pero la profundidad de penetración es menor.

El funcionamiento del Georadar se basa en las ecuaciones de Maxwell (3.1), y en las ecuaciones constitutivas (3.2):

$$\nabla D = \rho_f; \nabla B = 0; \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} + M; \nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (3.1)$$

$$D = \varepsilon E; H = \frac{B}{\mu}; J = \sigma E \quad (3.2)$$

Donde E = campo eléctrico, H = campo magnético, D = Campo de desplazamiento eléctrico, B = inducción magnética, J = densidad de corriente, M = campo de magnetización y ρ_f = densidad de carga libre. Los parámetros que aparecen en la ecuación (3.2) describen las propiedades electromagnéticas del medio y son: ε (permitividad dieléctrica), μ (permeabilidad magnética) y σ (conductividad eléctrica).

El uso del GPR está basado en la permitividad dieléctrica ε , la cual representa la permitividad de un pulso electromagnético a través del medio comparado con la permitividad en el vacío. Es un parámetro no dimensional que depende de la conductividad eléctrica y el espesor de la capa de material. Para la mayoría de los materiales que componen el suelo, este parámetro varía entre 1 (aire) y 81 (agua). El GPR produce resultados detectando ondas reflejadas producidas cuando la onda atraviesa interfaces entre dos materiales con diferente constante dieléctrica.

Los suelos son a menudo una mezcla de distintos materiales. Separadamente, cada elemento tiene sus propias propiedades electromagnéticas. Juntos, constituyen un medio donde la permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y la conductividad eléctrica dependen de las propiedades de cada material y de su porcentaje en la mezcla. Existen varios modelos que caracterizan estas mezclas, que se pueden utilizar también considerando al medio como constituido por una fase sólida más agua y aire (Pérez, 2001).

Las ondas electromagnéticas se propagan en el agua a muy baja velocidad y con gran atenuación. La permitividad dieléctrica del agua es alta (alrededor de 80, pero varía con la temperatura y con la composición mineralógica) y contrasta en la velocidad media de propagación de los otros materiales que componen el suelo. Esto hace que el agua sea un elemento clave en la propagación de ondas en el suelo.

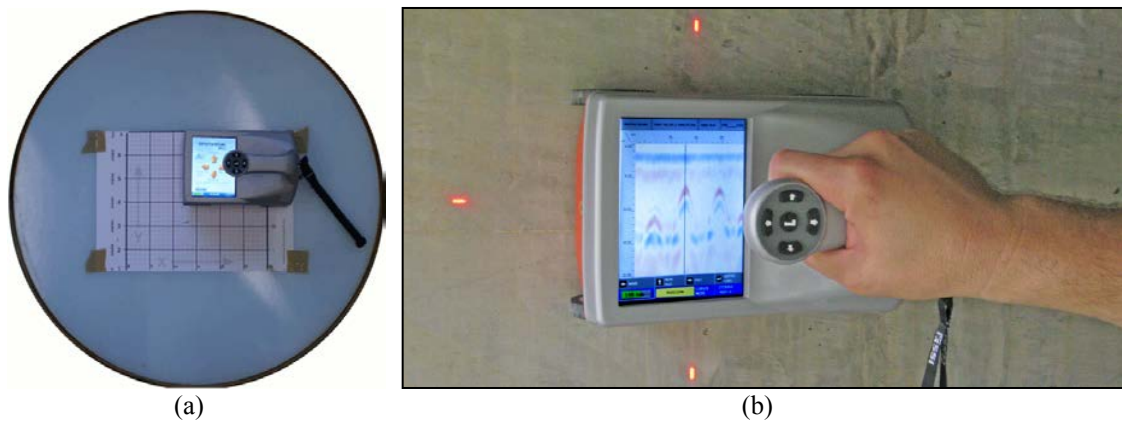


Figura 3.1 – **GPR:** a) Muestra de suelo en bandeja circular 80 cm de diámetro y 10 cm de altura, placa de metacrilato con cuadrícula de 30x30 cm y Georadar; b) Equipo de Georadar StructureScan Mini de GSSI.

Estudios realizados por (Knoll & Knight, 1994) muestran que para frecuencias usuales de GPR, la permitividad eléctrica y la conductividad eléctrica de un suelo aumentan con el grado de saturación. Además del grado de saturación, el tamaño de las partículas y la porosidad influyen también en el valor promedio de dichos parámetros.

3.1.1. GPR Aplicado a la Auscultación de Suelos en Dsecación y Agrietamiento

Por tratarse de un material natural, el suelo presenta heterogeneidad que es difícil de caracterizar para poder predecir su comportamiento mecánico e hidráulico. Desde el punto de vista del agrietamiento por desecación, interesa poder monitorizar lo que ocurre dentro del seno de la masa de suelo durante el proceso, para detectar grietas internas que se generan y propagan antes de aparecer y hacerse visibles en la superficie. El sistema de GPR StructureScan Mini de GSSI®, es un equipo compacto que permite auscultar el suelo con relativa facilidad. Las especificaciones técnicas, frecuencia de trabajo, peso, dimensiones, etc. se pueden ver en el Anexo C de la presente tesis. El aparato se desliza sobre una placa de metacrilato sobre la cual se dispone una cuadrícula de diferentes dimensiones según el caso (Figura 3.1a), la cual define las trayectorias por donde habrá que pasar el equipo para recoger los datos y luego procesarlos. Para guiar su recorrido, el GPR dispone de tres láseres (Figura 3.1b) que permiten seguir con precisión las rutas que establece la cuadrícula.

3.1.1.1. Equipo de GPR utilizado para el Ensayo



Figura 3.2 - Muestra de suelo. (80 cm de diámetro x 10 cm de altura) y placa de metacrilato con grilla de trabajo (30 cm x 30 cm, calles cada 5 cm).

Uno de los grandes desafíos de la geotecnia es sin duda poder mejorar la capacidad de caracterización del suelo para su estudio. Al tratarse de un material natural, el suelo presenta por lo general infinidad de imperfecciones, heterogeneidades, variaciones punto a punto de sus propiedades y, lo que es más difícil de precisar, una distribución aleatoria de dichas características.

Cuando se estudia el proceso de contracción y agrietamiento de suelos, uno de los problemas es que al tratarse de un proceso netamente tridimensional es muy difícil poder llevar a cabo ensayos que monitoricen las grietas en 3D. A la hora de plantear una solución para una caracteriza-

ción tridimensional de una muestra sometida a desecación se recurren a técnicas como los rayos X, resonancias magnéticas o tomografías computadas. En el primer caso, los equipos de rayos X son caros por un lado y requieren de una instalación especial y muy controlada por temas de seguridad para evitar contaminación y daños a la salud de los operadores y de los posibles visitantes en los laboratorios. Las resonancias y tomografías, pensadas en un principio para auscultar el cuerpo humano, son costosísimos equipos de dimensiones por lo general no adecuadas y que como es lógico se encuentran emplazados en hospitales donde llevar una muestra de suelo se hace difícil.

Los sistemas de GPR actuales, por el contrario, son equipos fácilmente portables, con un coste mucho menor y que en los últimos años han ido ganando terreno en el campo de la auscultación geotécnica y en obras civiles de hormigón. Para este trabajo se ha utilizado el StructureScan Mini de GSSI®, para auscultar muestras de suelo sometidas a desecación, para comprobar si estos equipos son capaces de detectar grietas en el suelo con suficiente precisión.

Los objetivos de implementación del uso de este sistema radican en poder detectar grietas que no son visibles a simple vista y que no pueden ser fotografiadas durante el desarrollo de un ensayo de desecación. Para ello, se ha procedido a probar el equipo auscultando una muestra de suelo en proceso de desecación para determinar la capacidad del sistema respecto de la detección y acotar las capacidades y limitaciones del mismo. Comparando los resultados del post-proceso de los datos recogidos con el equipo y contrastando con las grietas visibles, es posible determinar las capacidades del sistema. Por otro lado, se presenta una metodología de trabajo para poder utilizar el equipo en la auscultación de suelos arcillosos sometidos a procesos de desecación y agrietamiento (Prat, et al., 2013).

3.1.1.2. Auscultación con Georadar (GPR).

En el laboratorio se ha utilizado el sistema descrito para la auscultación de una muestra de suelo contenida en una bandeja de *80 cm de diámetro por 10 cm de altura (50,27 litros)*. La arcilla inicialmente en estado fluido (“*slurry*”) se ha volcado en la bandeja dejándola secar al aire durante *36 días*. Periódicamente, se ha auscultado la muestra con el equipo GPR calibrando los parámetros necesarios del equipo (constante dieléctrica y dimensiones de la cuadrícula de trabajo) a los requerimientos del ensayo. La humedad relativa del ambiente del laboratorio se ha mantenido aproximadamente al *60%* y la temperatura a unos *24°C*.

Para poder desplazar el GPR sobre la muestra de suelo, se ha utilizado una placa de metacrilato de *1 cm* de grosor sobre la cual se dispone la cuadrícula que delimita la zona de auscultación.

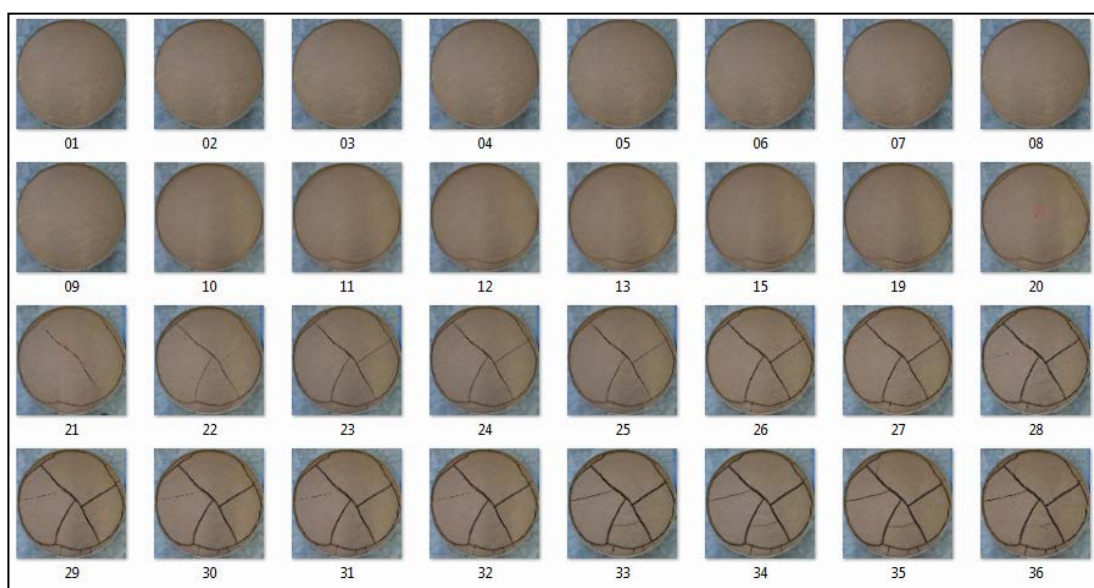


Figura 3.3 - Evolución de la muestra durante 36 días bajo desecación y agrietamiento. *Vista de la cara superior.*

Esta zona es un rectángulo de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ que define 7 trayectorias horizontales y 7 verticales, ortogonales entre sí, y separadas por una distancia de 5 cm (Figura 3.2). En definitiva la zona de ensayo se reduce a una porción de suelo de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (9 litros) en la zona central de la muestra de suelo.

Hay que tener en cuenta que el proceso de secado va reduciendo el espesor de la muestra de suelo a partir de los 10 cm iniciales llegando a valores usuales de entre $7\text{ y }8\text{ cm}$ según las condiciones iniciales de humedad de la muestra. En la Figura 3.2 puede verse la muestra de suelo colada en la bandeja y la placa de metacrilato con la cuadrícula sobre la cual se pasa posteriormente el GPR.

El equipo utilizado permite configurar el valor de la constante dieléctrica entre $4\text{ y }12$. Los mejores resultados se obtuvieron con el valor de 12 . Se puede configurar también la profundidad de penetración del Georadar entre $20\text{ y }40\text{ cm}$ siendo la menor, obviamente, la más cercana a nuestro caso. En la Figura 3.3 se presenta la evolución de la muestra de suelo sometida a desecación durante los 36 días que duró el ensayo. Puede verse que en la zona de estudio han aparecido grietas suficientes como para estudiar la capacidad que tiene el equipo para la detección de grietas.

3.1.1.3. StructureScan Mini Viewer

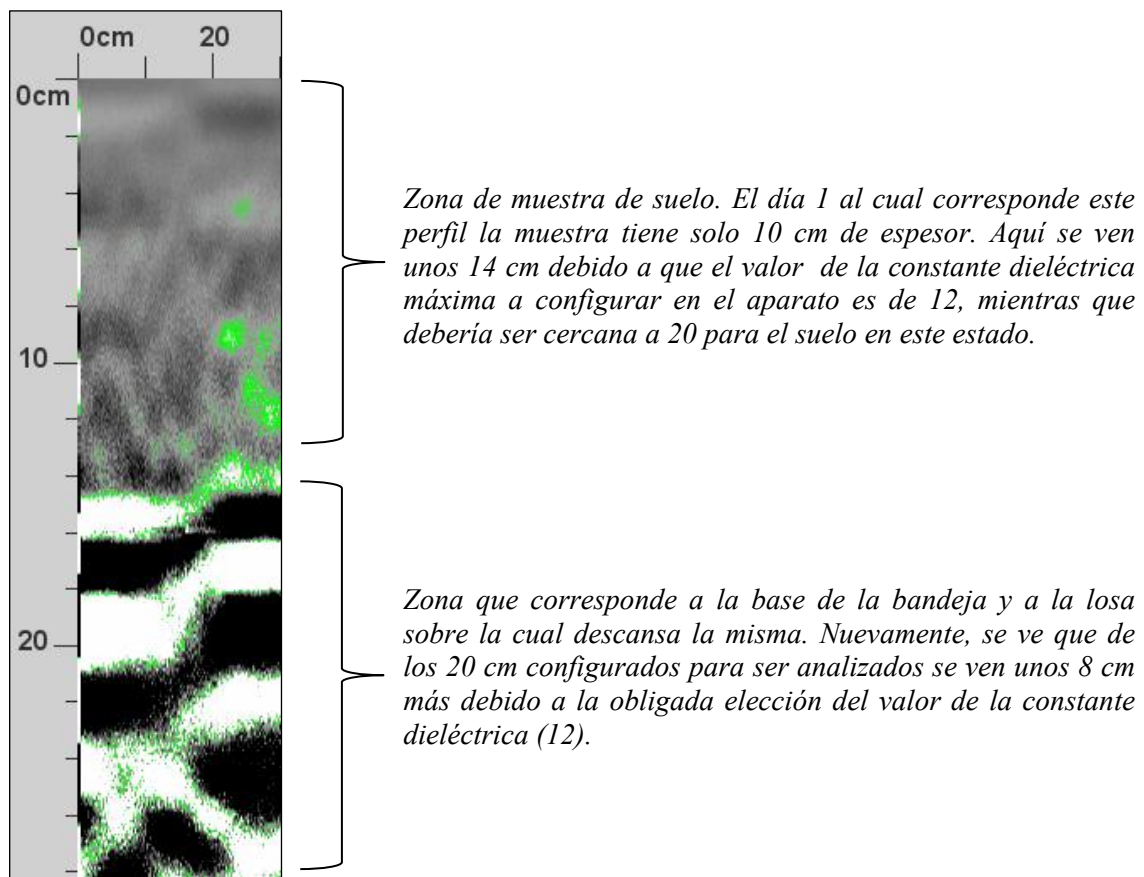


Figura 3.4 - Perfil de post-proceso típico del software online *StructureScan Viewer*.

La empresa GSSI® (<http://www.geophysical.com/structurescanmini.htm>) proveedora del equipo, pone a disposición del usuario un software de post-proceso “online” de los datos recogidos por el aparato llamado “StructureScan Viewer”. Este software permite gestionar gráficas 2D de perfiles de suelo de la muestra donde se han recogido los datos del GPR, es decir, el resultado de la emisión y posterior recogida de los rebotes de las ondas electromagnéticas.

Entre otras cosas, el programa permite establecer valores diferentes de la constante dieléctrica para ajustarlos mejor al medio utilizado y poder así capturar mejor las dimensiones reales de la muestra de suelo auscultada. Se sabe que el suelo entre los estados seco y saturado tiene una constante dieléctrica que varía entre 20 y 30 (Peplinsky, et al., 1995). Como ya se ha indicado, el aparato permite fijar inicialmente una constante dieléctrica entre 4 y 12, lo cual distorsiona las dimensiones de la muestra de suelo estudiada, en cuanto a su espesor en el post-proceso (Figura 3.4). En esta figura se muestra el resultado típico obtenido tras procesar la información mediante el software StructureScan Mini Viewer en una pasada de Georadar (un perfil).

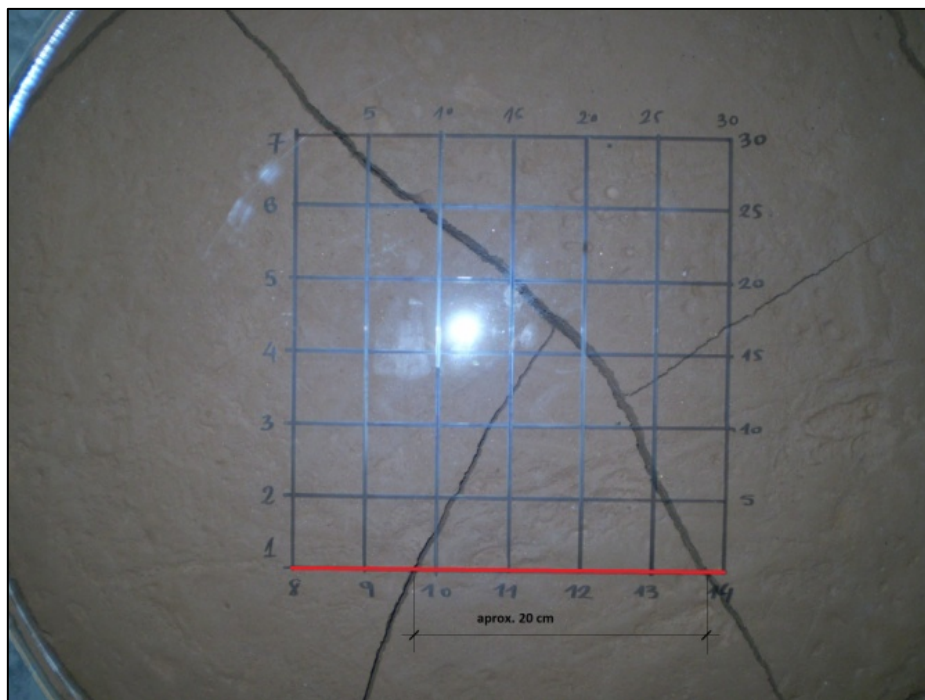


Figura 3.5 - Trayectoria 1 horizontal de recorrido del GPR. Día 22 de desecación.
Recorrido de izquierda a derecha.

Otra modificación importante que permite el software es la ganancia de las ondas lo cual mejora muchas veces la claridad de las gráficas para poder interpretarlas.

El equipo utilizado permite presentar las imágenes recogidas por el GPR en una variada gama de colores, lo cual puede ser útil para lograr mayores posibilidades de interpretación de los resultados. Centrando nuestra atención en el *día 22* de secado y en la trayectoria 1 mostrada en la Figura 3.5 se ve que hay tres grietas visibles en superficie, de las cuales dos son de un considerable grosor e intersectan la trayectoria 1.

En la Figura 3.6 se observan cinco de las 10 variantes de post-proceso de las señales denominadas: *rainbow*, *grayscale black white*, *grayscale white black*, *gray glow* y *positive peak only*. Hay que tener en cuenta además que con el software se ha modificado el valor de la constante dieléctrica hasta el máximo permitido de 20, el cual se acerca a los valores típicos de suelos parcialmente saturados como corresponde al estado de la muestra el *día 22*. En la figura puede apreciarse que el espesor de la muestra de suelo recogido por el GPR se corresponde con las dimensiones de la muestra real (unos 8 cm).

Las siguientes cinco variantes en post-proceso se ven en la Figura 3.7: *muted negative peaks*, *blue white red*, *deepblue white red*, *blue white darkred* y *gray red green blue*.

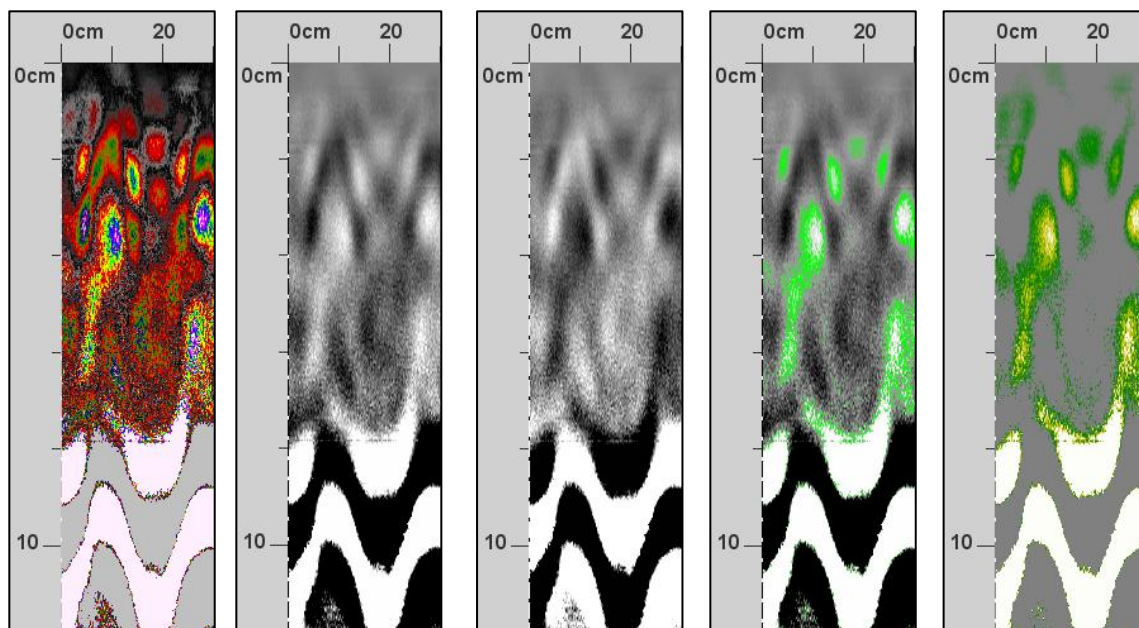


Figura 3.6 - Distintas opciones de post-proceso del equipo. De izquierda a derecha: *Rainbow, grayscale black white, grayscale white black, gray glow y positive peak only.*

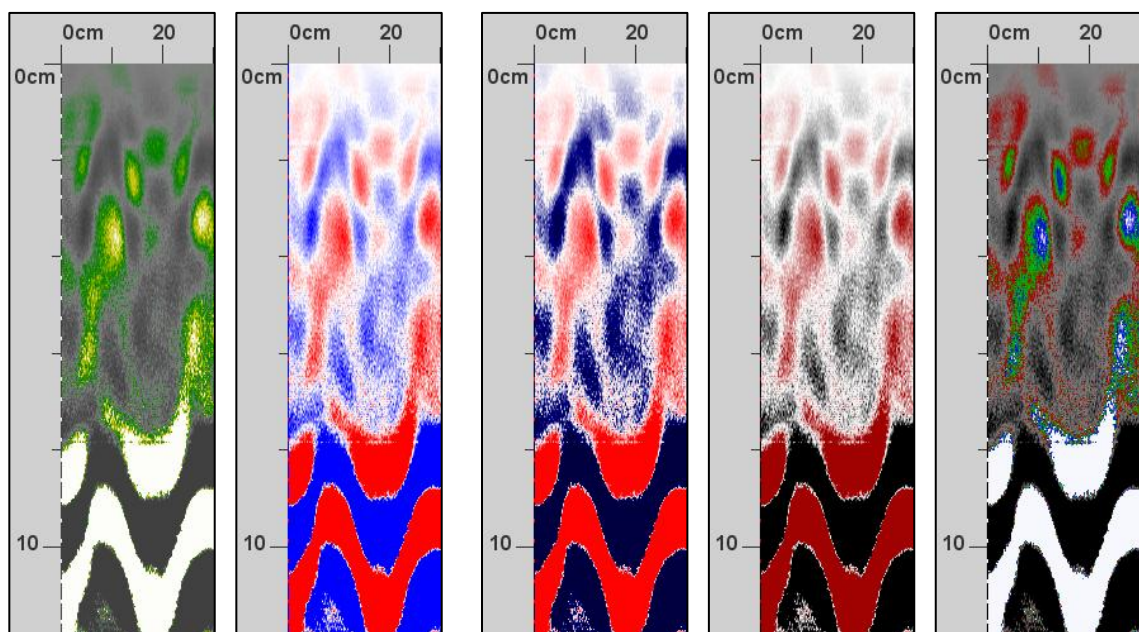


Figura 3.7 - Distintas opciones de post-proceso del equipo. De izquierda a derecha: *Muted negative peaks, blue white red, deep blue white red, blue white dark red y gray red green blue.*

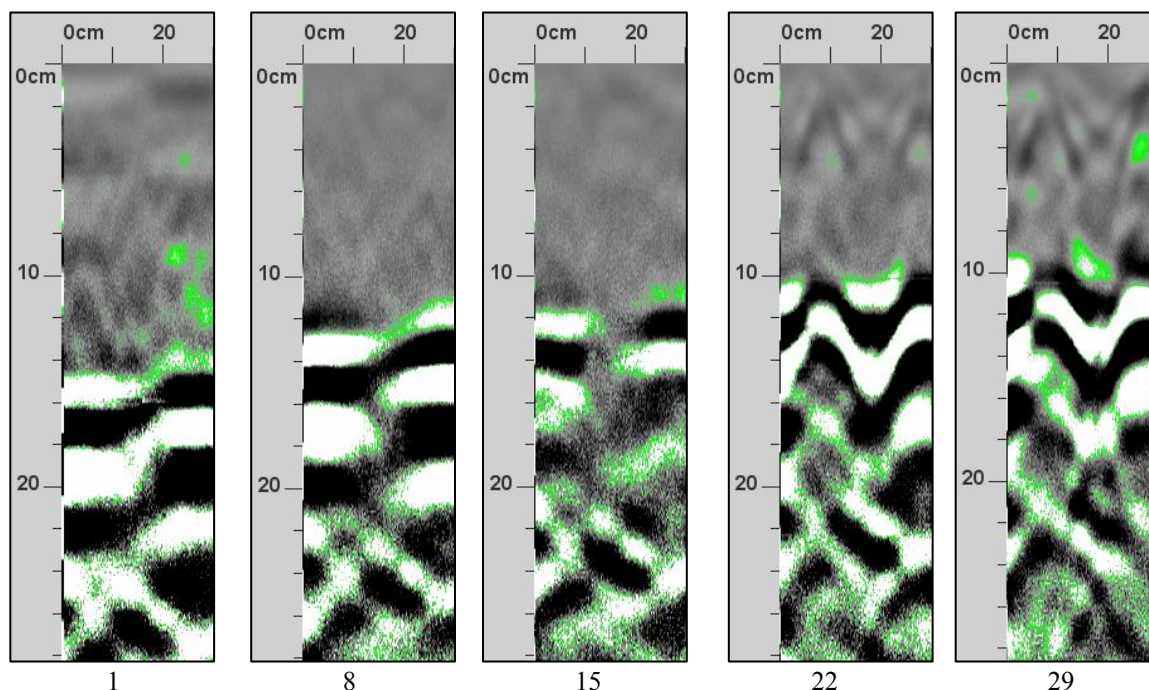


Figura 3.8 - Evolución de un perfil de la muestra para los días 1, 8, 15, 22, y 29.

La elección de una u otra es una decisión personal del operador del aparato ya que subjetivamente será mejor o peor para unos u otros. La cuestión pasa por entrenar la visión para poder identificar si los gráficos muestran o no grietas.

En todos los casos, como es lógico, la zona útil son los 8 cm desde el límite superior y hacia abajo. El resto del esquema corresponde al forjado sobre el cual está apoyada la bandeja que contiene el suelo.

En la Figura 3.8 se observa la evolución de la muestra de suelo, de izquierda a derecha, correspondiente a los días 1, 8, 15, 22 y 29 respectivamente. Todos estos perfiles corresponden a pasadas de GPR sobre la trayectoria 1 que se observa en la Figura 3.5. Puede verse la progresiva contracción de la muestra debido a la desecación, así como también, en los días 22 y 29, la aparición de cierto patrón que como se verá más adelante corresponden a la existencia de grietas.

El primer día de ensayo, se ha recogido un perfil que parece ser bastante heterogéneo con respecto a los días sucesivos. La razón de esto es el poco tiempo transcurrido desde que se volcó el suelo en la bandeja de ensayo y el consiguiente desorden del agua y partículas del suelo debido a la energía entregada al sistema durante el proceso de amasado y a su posterior volcado en la bandeja.

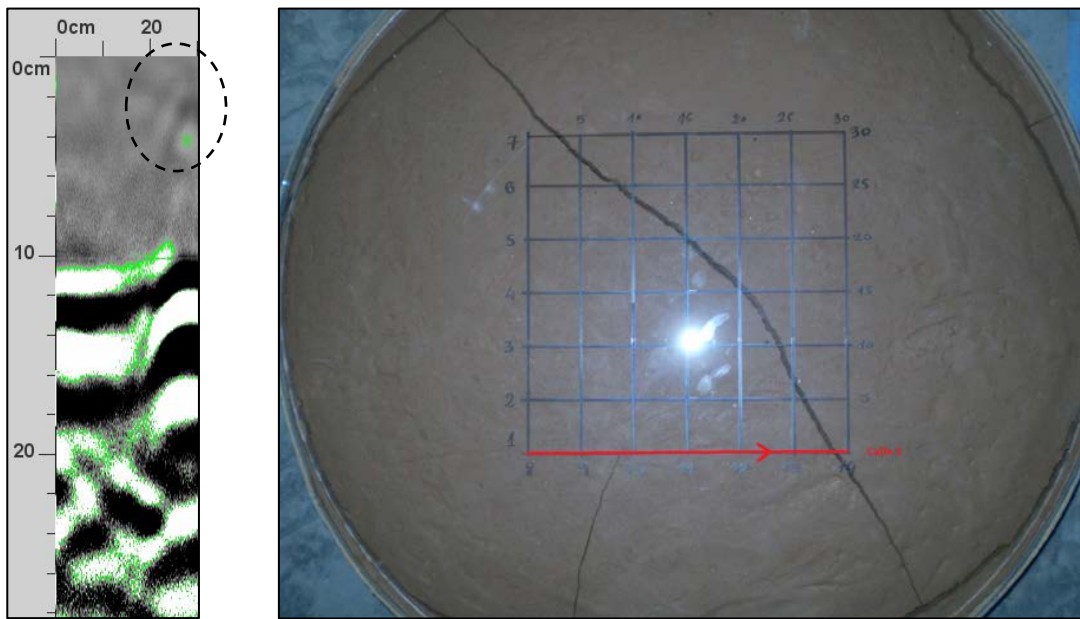


Figura 3.9 - Perfil obtenido en la trayectoria 1 el día 21.

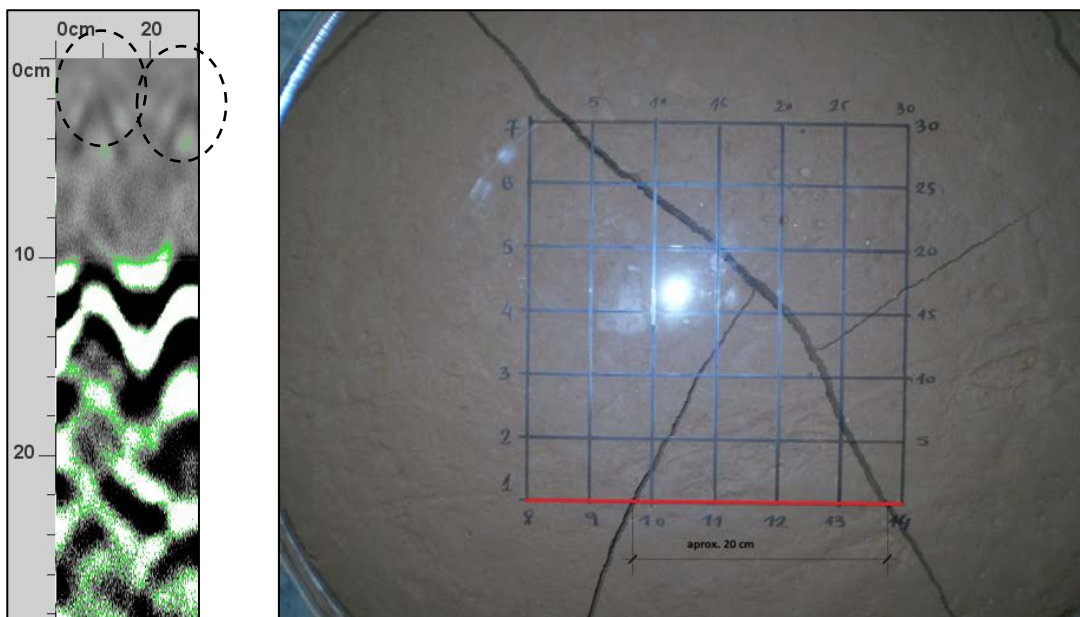


Figura 3.10 - Perfil obtenido en la trayectoria 1 el día 22.

También en este momento es cuando tenemos mayor atenuación porque el grado de saturación es el máximo debido a que el suelo está saturado y el agua tiene un valor de la constante dieléctrica cercano a 80, lejos del que corresponde a la arcilla (20-22). El propio amasado y volcado puede contribuir a originar zonas o puntos en el suelo susceptibles de producir luego grietas durante la desecación. El perfil analizado muestra que esta potencialidad tiende a desaparecer tras las primeras horas de reposo.

En los días subsiguientes, luego de *24 horas* de ensayo, el agua que sobresatura al suelo asciende a la superficie y el resto se distribuye de manera homogénea dando a partir del *día 2* unos perfiles de Georadar más homogéneos Figura 3.8 (días 8 y 15).

Los *días 8 y 15* presentan unos perfiles en tonos de grises bastante homogéneos lo cual lleva a pensar que en la zona de estudio no se producen grietas internas ni heterogeneidades importantes.

Una cuestión de suma importancia es establecer cómo puede reconocerse una grieta en el suelo mediante el GPR. En la Figura 3.9 se presenta el perfil resultante de la pasada del *día 21* en la trayectoria 1 donde se contrasta una grieta visible con el perfil obtenido con el GPR. En esta figura se observa que la grieta que recorre toda la muestra y toda la zona de análisis se corresponde con una mancha de forma parabólica en la esquina superior derecha del perfil de GPR. La pequeña grieta casi vertical que se ve en la foto y que hace contacto con la trayectoria 1, en rojo, no es detectada. Esto es sencillamente porque no ha alcanzado la zona de radiación de las ondas electromagnéticas del GPR.

En la Figura 3.10 se observa lo ocurrido el *día 22*, en la trayectoria 1, en rojo. En este caso ambas grietas atraviesan la zona auscultada por el GPR y son visibles en el perfil, quedando claro el tipo de patrón a buscar cuando se utilice el sistema para detectar grietas no visibles.

En la Figura 3.11 (*izquierda*) vemos el perfil obtenido el mismo *día 22*, pero en la trayectoria 3, en rojo, donde las grietas se hallan más juntas una de otra. Pueden reconocerse las grietas y su distancia en centímetros, midiendo la distancia entre picos de las parábolas invertidas. Esto justifica afirmar que el sistema permite no sólo la detección de grietas aún invisibles en superficie, sino también la medida de la distancia entre ellas.

La siguiente cuestión es determinar qué grado de precisión y resolución puede esperarse de este método. En la Figura 3.12 se observa el perfil correspondiente al *día 22* para la trayectoria 4. En este caso las grietas están separadas unos *2.5 cm* y puede verse que el GPR no permite la distinción entre una y otra sino que se interfieren dando un patrón más marcado. Esto pone una limitación a la hora de determinar distancias entre grietas menores a unos *5 cm* hasta donde parece que el GPR es capaz de discernir grietas diferentes.

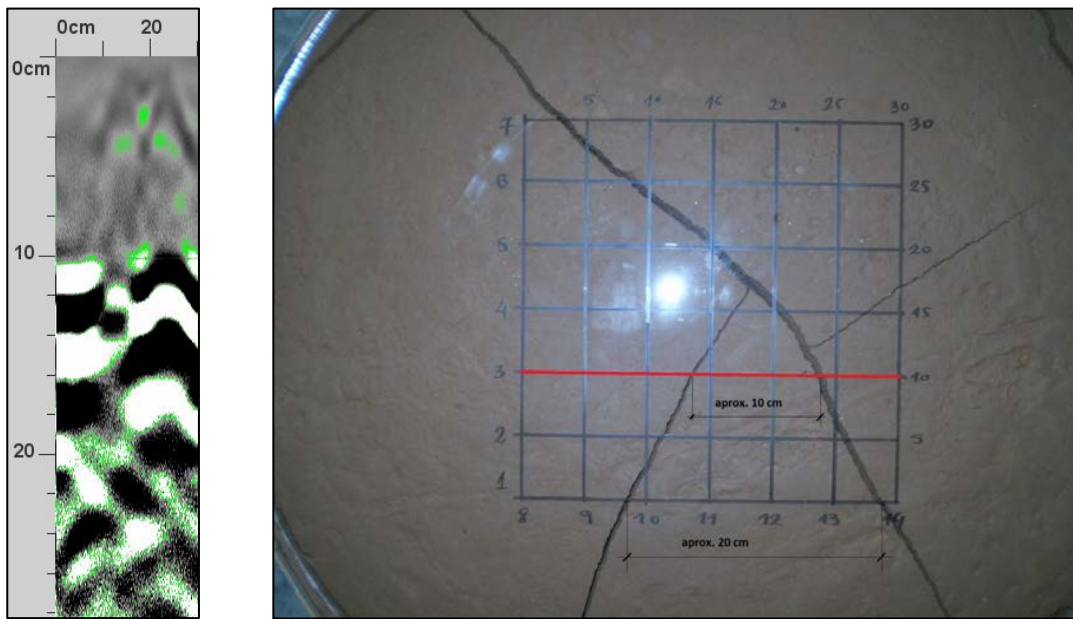


Figura 3.11 - Perfil obtenido en la trayectoria 3 el día 22.

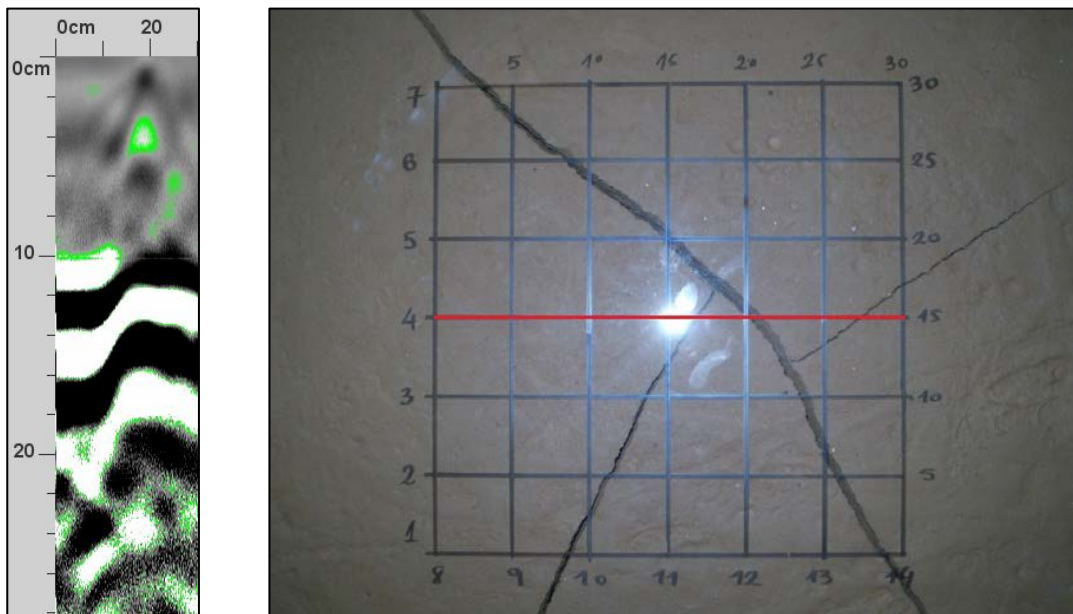


Figura 3.12 - Perfil obtenido en la trayectoria 4 el día 22

Otro tema importante es el poder identificar desde qué grosor de grieta se puede detectar, usando esta técnica. Como se ve en las figuras, es posible ver grietas de unos pocos milímetros de espesor pero en general, grietas capilares son por completo invisibles bajo el análisis de este sistema.

3.1.1.4. Detección de Grietas antes de su Aparición en Superficie

El siguiente paso, en la comprobación de las posibilidades del equipo, es establecer la capacidad del GPR para la detección de grietas que por alguna razón no son visibles a simple vista en la superficie de la muestra. Lo ideal es poder ver antes de que afloren a la superficie grietas que se originan en el fondo o en el interior de la muestra y que progresan hacia arriba. Otra alternativa es poder identificar grietas que se producen por debajo y que solo son visibles una vez que se haya acabado el ensayo y se proceda a desmantelar y desmoldar la muestra de suelo.

El *día 20* del ensayo, antes de la aparición de grietas visibles en la superficie de la muestra, se obtuvieron los *14* perfiles visualizados mediante el software: *StructureScan Viewer*². En la Figura 3.13 se observan los perfiles mencionados donde se resaltan los puntos sospechosos y proclives a corresponder a grietas internas que luego pueden o no emerger a la superficie. Posteriormente en la Figura 3.14 se muestran las mismas anomalías ubicadas en planta para ver si hay correspondencia en la dirección horizontal y vertical. A la izquierda se ve el aspecto de la zona de estudio a los *20 días* de secado. A la derecha se ve una imagen del *día 22* con las tres grietas visibles en superficie.

Con círculos y rectángulos se marcan, respectivamente, las anomalías en planta según hayan sido detectadas en dirección horizontal o vertical de las trayectorias seguidas por el GPR. Se ve como solo en tres casos dichas anomalías se detectaron tanto en dirección vertical como horizontal. En dos de estos casos, las anomalías se corresponden con grietas que se hicieron visibles en la cara superior del suelo dos días después. Sin embargo la que se encuentra sobre la trayectoria 5 no se corresponde con ninguna grieta visible. El *día 28* en cambio sí que aparece una grieta muy cercana a esta zona que luego evoluciona hasta hacerse de un tamaño importante como puede verse en la Figura 3.15. En la misma figura se observa el inicio de la grieta diametral que fue la primera grieta después de las grietas en contacto con la bandeja contenedora.

Es sabido que las grietas pueden aparecer primero en superficie, pero también en el fondo y en el interior de la muestra. La propagación puede darse hacia abajo, hacia arriba o hacia los lados aunque la dirección vertical es la más común en este tipo de ensayos donde predominan las dimensiones en el plano horizontal.

² El software StructureScan Mini Viewer es un programa de visualización gratuito online de GSSI. Es ideal para el post-proceso bidimensional de datos obtenidos con el StructureScan Mini. Sus características incluyen: Control de Contraste, Eliminación del Fondo, Tabla de Colores, Guardar/Convertir Imágenes. <http://www.geophysical.com/structurescanmini.htm>

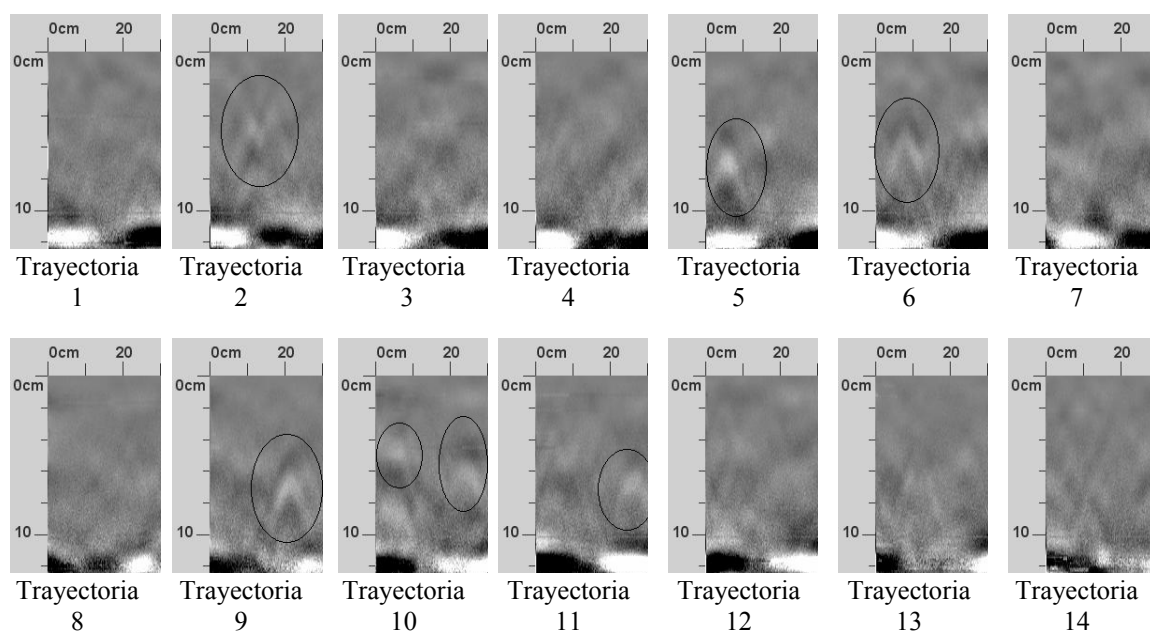
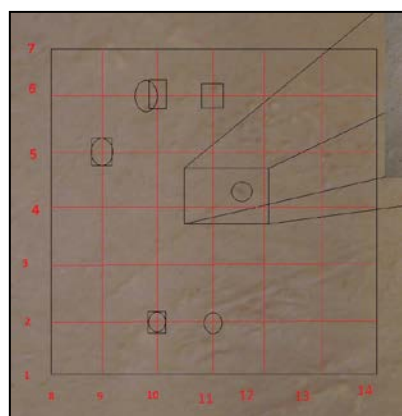
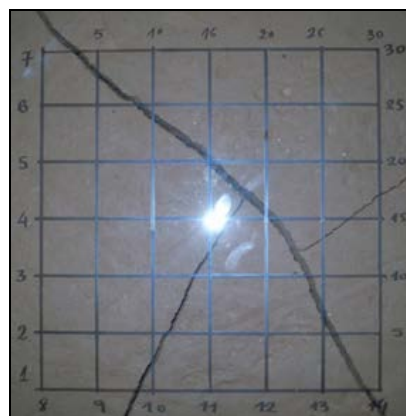


Figura 3.13 - Perfiles de las 14 trayectorias el día 20.

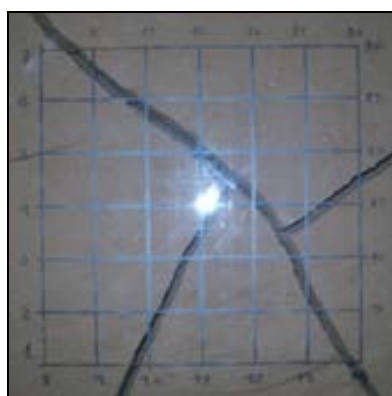


Día 20



Día 22

Figura 3.14 - Anomalías en planta el día 20. Grietas visibles el día 22.



Día 28



Día 36

Figura 3.15 - Aspecto de las grietas visibles los días 28 y 36.

3.1.1.5. Software RADAN 6.6

GSSI[®] proporciona un software potente para el tratamiento de los datos recogidos por sus sistemas GPR. En nuestro caso se ha trabajado con el software RADAN 6.6. Este software tiene muchas alternativas para el análisis a posteriori a los datos recogidos por el GPR. Entre todas las posibilidades la más interesante es poder poner en un solo gráfico tridimensional todos los datos recogidos durante las 14 pasadas de GPR en un momento determinado del ensayo (Figura 3.16).

Siguiendo con el análisis del día 22 de desecación y agrietamiento, vemos en la Figura 3.16, los *14 perfiles* obtenidos con el StructureScan Mini unos junto a otros. Esto es lo que se obtiene cuando se crea un proyecto 3D con RADAN 6.6.

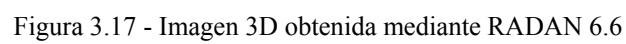
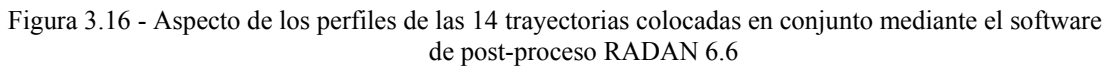
Como se había comentado antes, la zona de estudio está formada por un prisma de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, al menos al inicio del ensayo. RADAN permite visualizar dos perfiles y el post-proceso de una sección horizontal de manera simultánea para lograr así una visión cuasi-3D, como puede verse en la Figura 3.17.

Otra posibilidad es la de ir seleccionando el perfil horizontal y/o vertical deseado según conveniencia para analizar los distintos puntos de la cuadrícula de trabajo.

En general el programa RADAN cuenta con herramientas típicas de los programas de CAD, con lo cual resulta sencillo efectuar acercamientos y analizar zonas locales de interés. También cuenta con una gran cantidad de opciones de colores, permitiendo variar los parámetros necesarios para lograr imágenes nítidas y útiles para descubrir donde hay anomalías o puntos sospechosos. Un parámetro que influye mucho en el post-proceso es la ganancia, así como también la ya mencionada constante dieléctrica.

Se describe a continuación la manera de seguir con el GPR el desarrollo de la grieta principal el día 22 de desecación. En la Figura 3.19 se muestra la grieta y se enumeran los puntos de interés (*numerados del 1 al 7*) para captarla mediante las imágenes cuasi-3D de RADAN. Como se observa en las imágenes de la Figura 3.20, puede seguirse con relativa facilidad el recorrido de toda la grieta.

En la Figura 3.21a y b, se observan dos imágenes del estado final de la muestra de suelo. Como puede verse en la Figura 3.21b, existen pequeñas grietas en el fondo de la muestra que no han emergido a la superficie. Estas grietas han resultado por completo invisibles al Georadar y por lo tanto una predicción de su existencia resulta improbable por ahora.



Elección de perfiles y planos horizontales

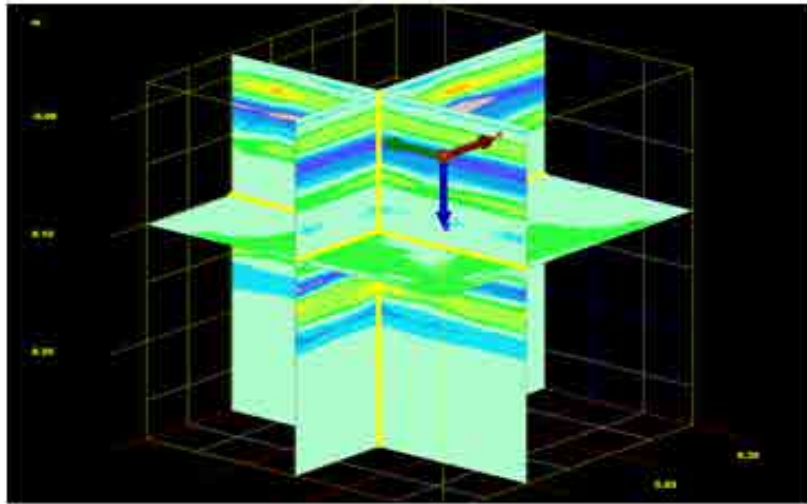


Figura 3.18 - Perfiles perpendiculares graficados con RADAN 6.6

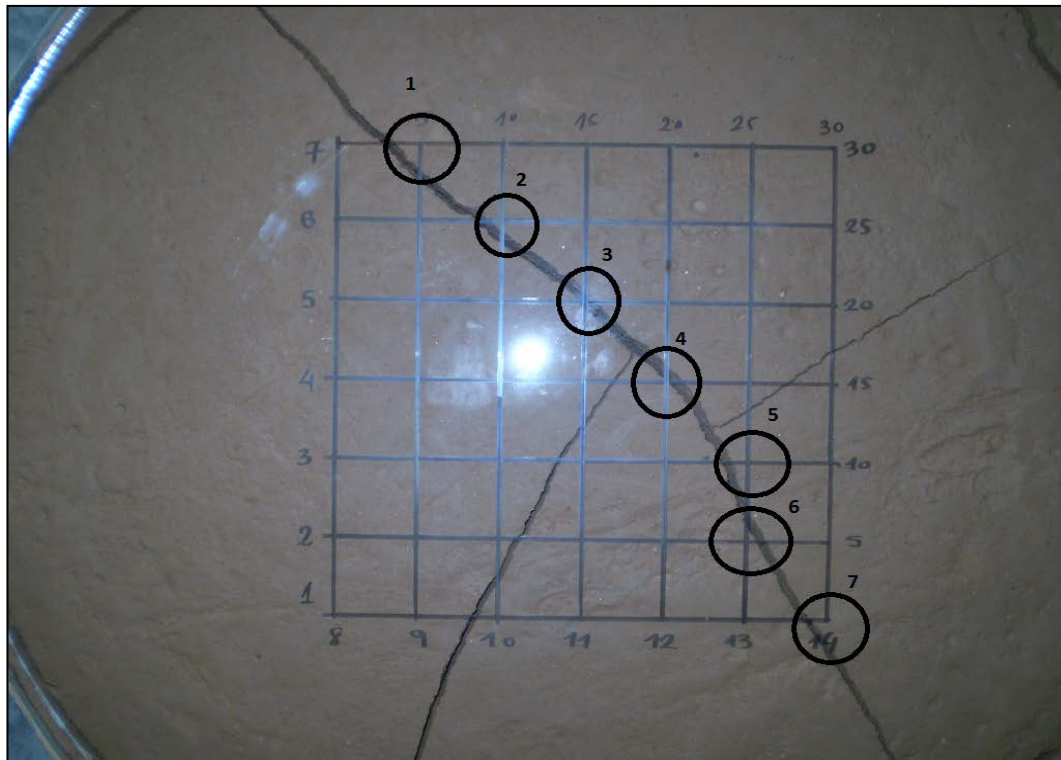


Figura 3.19 - Puntos de estudio sobre una grieta de la muestra de suelo

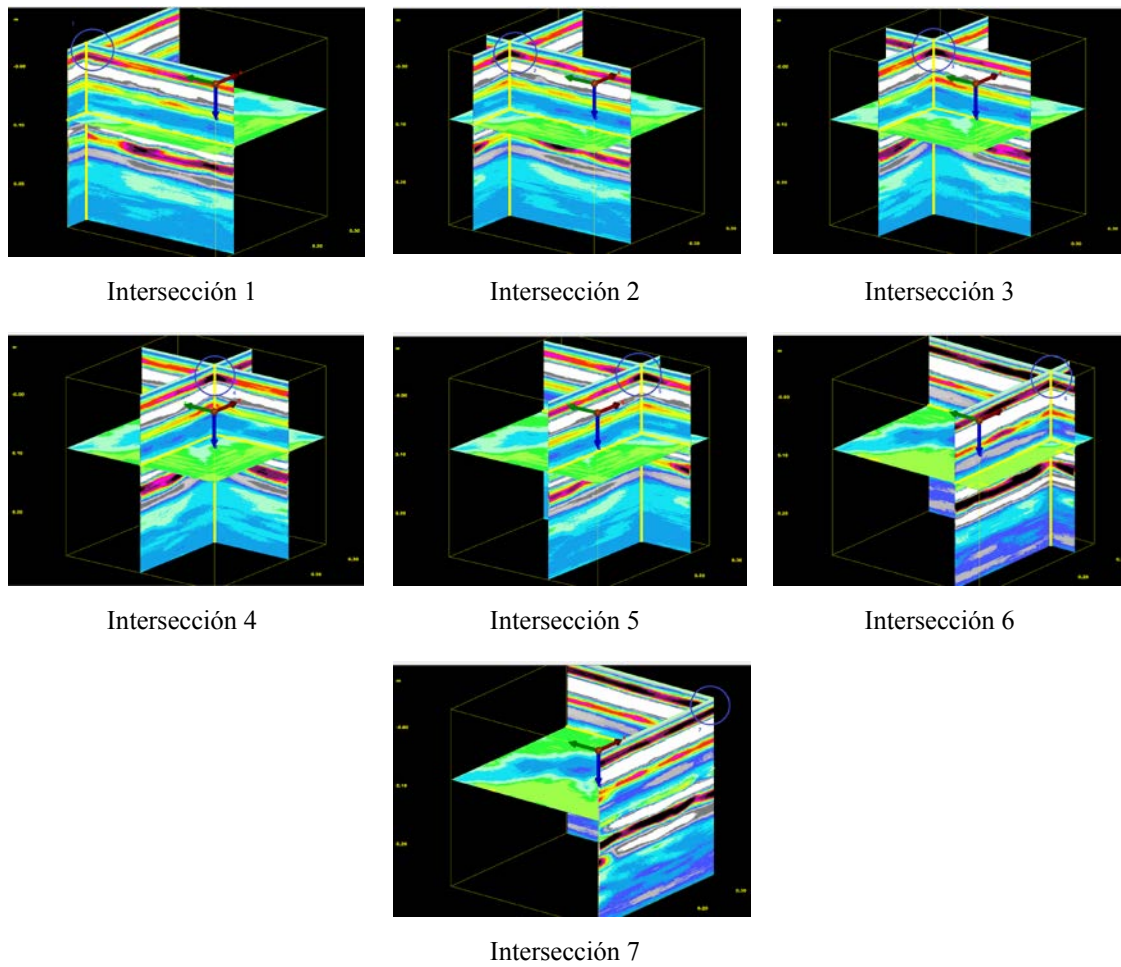


Figura 3.20 - Intersecciones de perfiles en los puntos de estudio

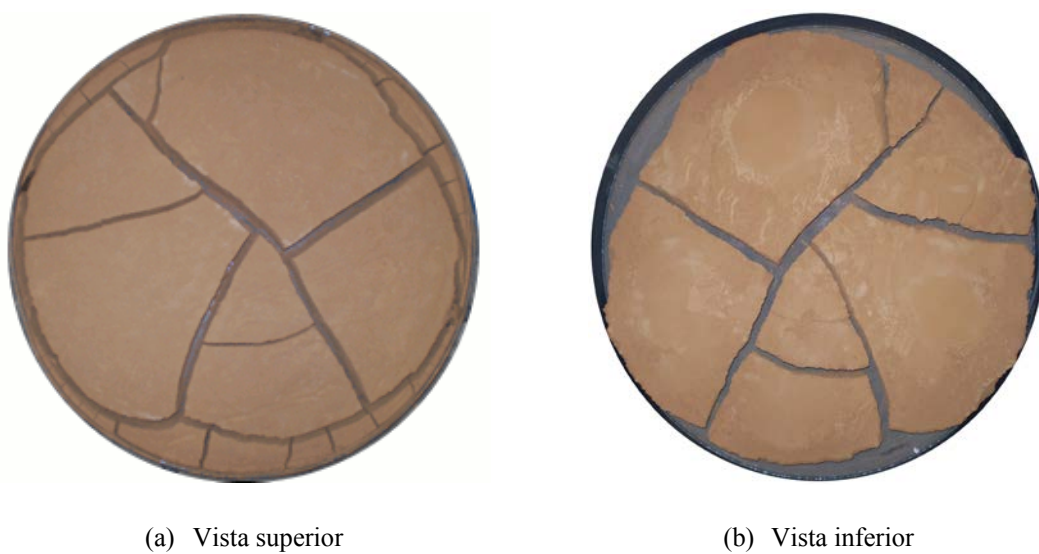


Figura 3.21 - Aspecto final de la muestra luego de los ensayos con GPR.

3.1.2. Conclusiones de las Capacidades del Equipo

El sistema de Georadar es sensible a los cambios de humedad que sufre el suelo durante la desecación. Es capaz de detectar también cierto grado de heterogeneidad en la masa de suelo inmediatamente después del volcado en la bandeja. En cuanto a las grietas, el GPR es capaz de detectar grietas de unos pocos milímetros de grosor ($1-2\text{ mm}$). También es capaz de determinar la separación entre grietas cuando la distancia entre éstas es de más de 5 cm . Grietas más cercanas entre sí producen interferencias que impiden la interpretación correcta de los datos. A medida que los aparatos de GPR vayan evolucionando, se podrá obtener mayor resolución a partir de mayores frecuencias de las ondas. La posibilidad de configurar el equipo para espesores idénticos al de las muestras, así como poder aproximar mejor el valor de la constante dieléctrica en las distintas etapas, mejoraría también la eficacia del método. Por ahora, resulta más fácil adaptar el espesor de las muestras a las posibilidades del aparato, cosa que es fácilmente realizable.

El entrenamiento en el uso de la herramienta es fundamental para poder hacer buenas predicciones. El estudio y aprovechamiento de todas las posibilidades del software está en proceso y puede llevar a futuras mejoras en la interpretación de los resultados. Esto, sumado a la continua evolución de los equipos, hace pensar que esta técnica puede ser en un futuro muy próximo una muy buena opción para caracterizar ensayos de desecación y agrietamiento. Con el fin de mejorar las capacidades del equipo para su aplicación a este tipo de estudios sería recomendable lo siguiente:

- Las trayectorias separadas 5 cm entre sí no dan una resolución suficiente como para detectar todas las grietas internas y que comienzan por debajo de la bandeja.
- Permitir configurar valores dieléctricos en el rango de la arcilla húmeda y seca.
- Permitir configurar profundidades de 5 , 10 y 20 cm que son usuales en el laboratorio.
- Permitir utilizar cuadrículas con más pasadas y con trayectorias más cercanas entre sí, por ejemplo cuadrícula de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ con 13 trayectorias horizontales y 13 verticales o incluso más densa sería interesante. Esto por supuesto de forma predefinida ya que de hecho es posible mediante el software RADAN fabricar zonas de estudio a medida para posteriormente componerlas y analizarlas en conjunto. Eso sí el arduo trabajo de hacerlo manualmente se reduciría mucho si el aparato lo definiera de manera estándar como es el caso de la cuadrícula utilizada para este trabajo.

Como se ha dicho previamente, las técnicas de Georadar parecen prometedoras aunque al día de hoy tengan algunas limitaciones. Combinando las capacidades del GPR con los sistemas tradicionales y especiales montados para ensayar desecación se puede mejorar mucho la predicción y el entendimiento de las razones y las formas en que el suelo contrae y posteriormente inicia y propaga las grietas. Una ventaja fundamental del sistema GPR es su relativo bajo coste en relación a otros sistemas como los rayos X, las tomografías y las resonancias magnéticas. Además, su portabilidad y facilidad de manejo y continua evolución lo hace una buena elección para trabajar en el campo y en el laboratorio. En la actualidad existen ya en el mercado versiones mejoradas del equipo utilizado en este trabajo y también versiones mejoradas para Windows 7 del software RADAN.

3.2. Bandejas Rectangulares

En esta sección se presentan los resultados de ensayos de desecación en bandejas rectangulares. El primer ensayo se realizó con el fin de establecer la influencia del tamaño máximo inicial de las partículas de suelo en el patrón de agrietamiento. Los ensayos posteriores exploran la influencia de la relación de lados de las bandejas rectangulares en los patrones finales de grietas obtenidos después de la desecación.

3.2.1. Influencia del Tamaño Inicial de Partículas de Suelo

La preparación del suelo para estos ensayos consistió en la pulverización del suelo utilizando martillos de goma y tamizado hasta garantizar un tamaño máximo de partículas de 0.42 mm en un caso y 0.104 mm en el otro. A continuación, se procedió a mezclar el suelo pulverizado con agua asegurando la desaparición de grumos que pueden dar origen a grietas en el proceso de secado. Para ello se utilizaron contenedores para la preparación y se realizó la mezcla manualmente palpando en suelo con las manos y buscando grumos para su extracción o bien presionarlos hasta conseguir su desaparición.

Existen varios factores que condicionan la forma final y la configuración de las grietas por desecación, entre ellos el tamaño de partículas inicial. Los dos ensayos de secado realizados han puesto en evidencia esta relación y, como se verá más adelante, la diferencia entre los resultados de las dos bandejas estudiadas ha sido clara en términos visuales. Esta diferencia además, se ha comprobado utilizando un análisis de imagen para realizar un estudio cuantitativo y no solo cualitativo relativo al aspecto final del patrón de agrietamiento.

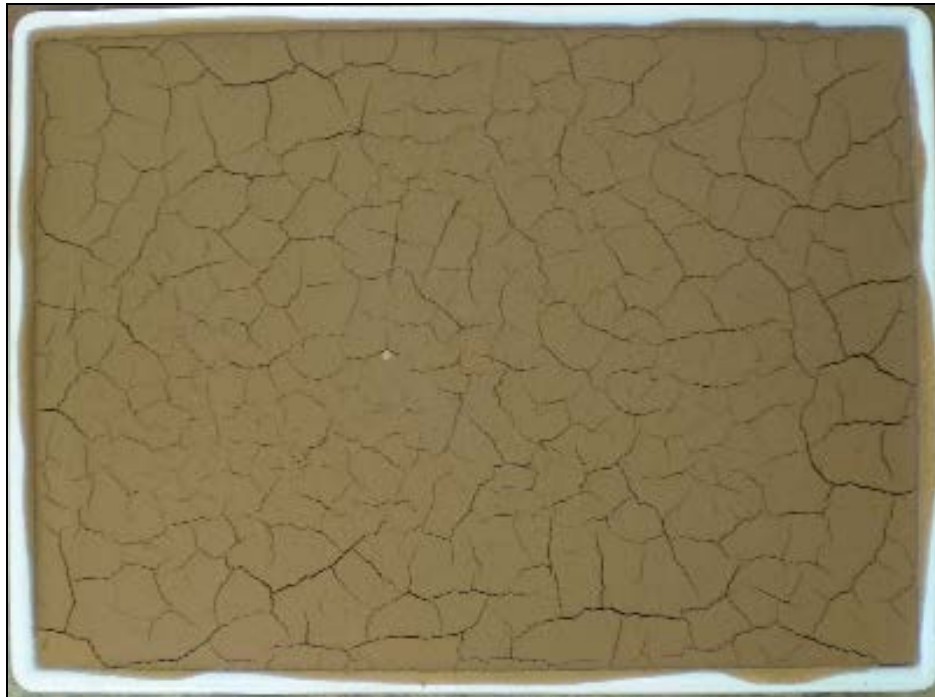


(a)



(b)

Figura 3.22 – Influencia del tamaño de partículas inicial: (a) *Aspecto inicial de la bandeja con lodo semifluido*; (b) *Aspecto luego de la desecación durante 5 días*



(a) Estado final tras 5 días de desecación. Tamaño máximo de suelo seco utilizado 0.42 mm. 5.88% de la superficie son grietas.



(b) Estado final tras 5 días de desecación. Tamaño máximo de suelo seco utilizado 0.104 mm. 7.94% de la superficie son grietas.

Figura 3.23 – Influencia del tamaño de partículas inicial: (a) *Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 40 (0.42 mm de paso)*; (b) *Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 140 (0.104 mm de paso)*

Se han llevado a cabo dos ensayos de secado de *5 días* de duración en los cuales las muestras han sido secadas en el ambiente del laboratorio (*temperatura de 22°C y humedad relativa del 56.5%*). Las bandejas fueron exactamente iguales de dimensiones *35.1 cm × 25.4 cm*, que contienen delgadas muestras de suelo en estado de lodo semifluido de *1 cm* de espesor. En la Figura 3.22 se presenta el aspecto inicial y final del suelo en una de las bandejas.

En las fotografías de ambas muestras desecadas, (Figura 3.23a, b) puede verse el efecto que tiene el tamaño máximo de partículas de arcilla inicial. Detalles del aspecto de las grietas en ambos casos se pueden ver en la Figura 3.24 y la Figura 3.25. La relación de tamaños máximos de partículas entre los dos casos ha sido de *4 a 1*. A primera vista y centrándonos en las fotos detalladas la diferencia es clara. En primer lugar el grosor de las grietas es mayor cuando el suelo es inicialmente más fino. Esto se debe a que partículas más finas son más ávidas de agua y por lo tanto habrá más poros que se contraerán en desecación. También en este caso el suelo presenta celdas de suelo mayores y más sanas al final de la desecación. El suelo más grueso presenta grietas más irregulares y con muchas fisuras capilares aunque como se dijo arriba de menor grosor.

La distribución de las grietas es en ambos casos regular, es decir, las células de suelo que permanecen sanas se distribuyen uniformemente en toda la bandeja.

3.2.2. Análisis de Imágenes

Se han hecho análisis de imágenes de las muestras desecadas en bandejas rectangulares con la finalidad de medir con buena precisión los resultados del agrietamiento al final del proceso. Para ello se ha utilizado el software ImageJ. Los detalles de esta tecnología pueden consultarse en (Lakshmikantha, et al., 2009). Básicamente la técnica consiste en aplicar diversos filtros a las imágenes para calcular área y longitud de las grietas.

El primer filtro, Figura 3.26b, corresponde a la transformación de la imagen en color a una imagen en escala de grises (*RGB a escala de grises de 8 bits*). A partir de la imagen en escala de grises se aplica el filtro para quitar el color de fondo y dejar exclusivamente las grietas sobre un fondo claro (Figura 3.26c). En la Figura 3.26d se puede ver el resultado de aplicar el filtro para obtener una imagen binaria ("*Binary*"). Esta última es la que permite distinguir de manera precisa entre grietas y celdas sanas de suelo. Para medir longitudes de grietas se utilizan otros filtros como "*Skeletonize*" que reduce las grietas a sus contornos (Figura 3.26e, f).



Figura 3.24 – Detalle: Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 40 (0.42 mm de paso)



Figura 3.25 – Detalle: Bandeja desecada de suelo tamizado con tamiz N° 140 (0.104 mm de paso)

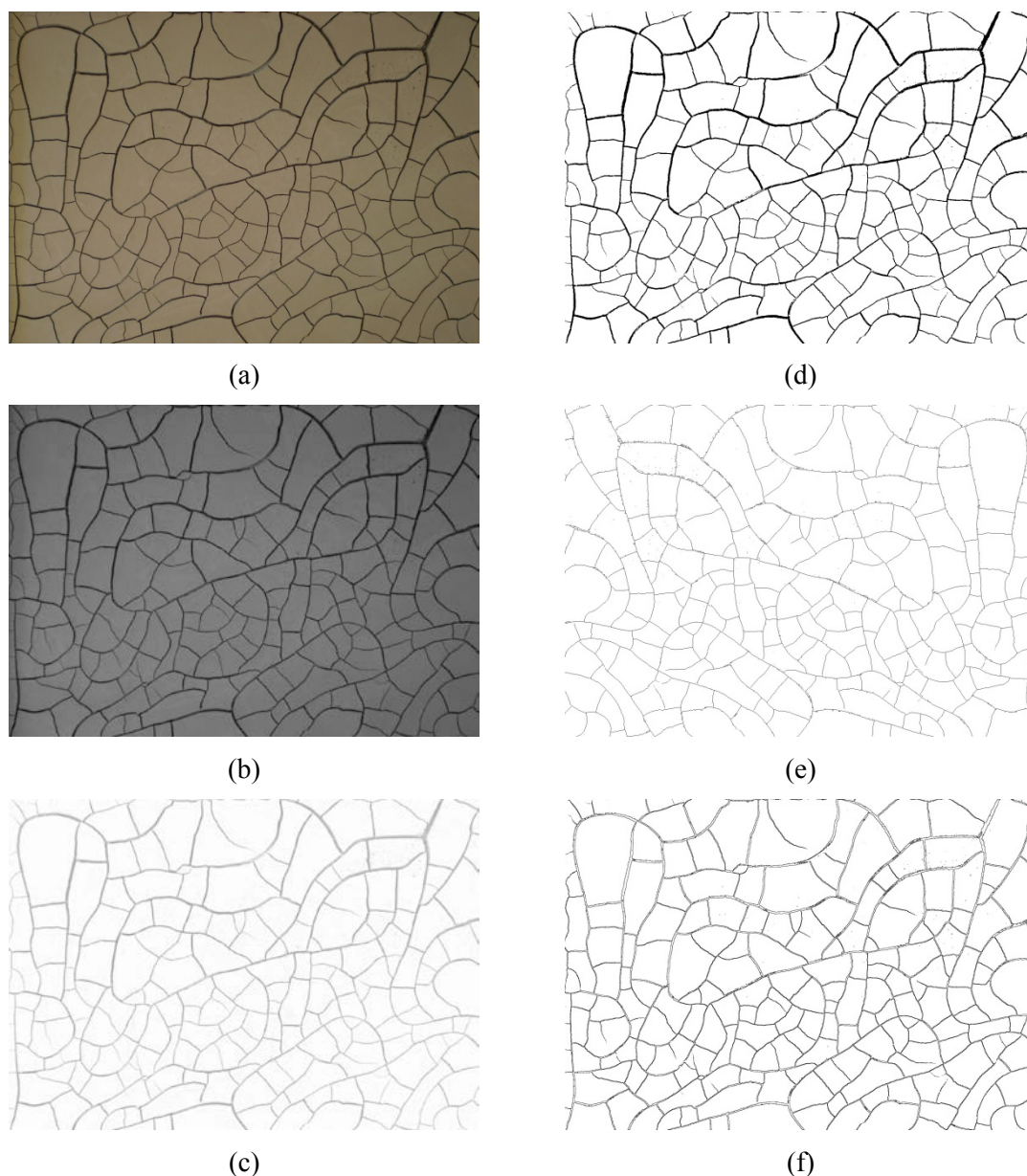


Figura 3.26 – Análisis de imágenes de la muestra de suelo con tamaño máximo de suelo seco utilizado de 0.104 mm.

A partir de las imágenes correspondientes al último día del ensayo (*día 5*, Figura 3.23), se edita la imagen de ambos ensayos para estudiar sus diferencias. La resolución de las imágenes a color es de 1669×1174 *pixeles*. Del análisis de imagen se desprende que la muestra con partículas más finas se agrieta más: 7.94% del área son grietas frente a 5.88% de la muestra con partículas más gruesas.



Figura 3.27 - Bandejas tamaño A2, secadas al mismo tiempo. 10.62% y 9.78% de la superficie son grietas para la bandeja con y sin división respectivamente. En la Figura se muestran los porcentajes de grietas de cada porción en correspondencia.

El análisis de imagen es una técnica muy sencilla de aplicar al procesamiento de imágenes obtenidas durante los procesos de secado. Otra ventaja es que el software utilizado es gratuito y sus capacidades van mejorando con el transcurso del tiempo.

Esta técnica resulta ideal para el caso de bandejas de pequeño espesor, puesto que las grietas se extienden a través de todo el espesor de la muestra de suelo. De esta forma, las mediciones de las áreas de las celdas y la longitud de las grietas permiten un cálculo bastante ajustado de la superficie de agrietamiento, la cual está relacionada con la cantidad de energía necesaria para desarrollar la fractura.

Desafortunadamente, en el caso de muestras de mayor espesor, las características de las grietas son de carácter tridimensional y esta técnica de análisis de imágenes no es del todo aplicable. Como se ha visto en el apartado anterior, para estos casos se necesitan técnicas más sofisticadas como las de Georadar, rayos X o tomografía computarizada. El problema con estas técnicas es que su costo y la complejidad de las instalaciones necesarias para su uso es mucho mayor.

3.2.3. Influencia de la Relación de Lados de las Bandejas

En las campañas anteriores realizadas en el laboratorio de Geotecnia de la UPC (Lakshmikantha, et al., 2009), se han utilizado bandejas de igual relación de lados (*serie DIN A*) para poder estudiar ciertos efectos sobre la forma de las bandejas pudiendo así comprobar la existencia del efecto tamaño.

En este apartado se presentan resultados de agrietamiento en bandejas subdivididas para obtener de manera sistemática relaciones de lados decrecientes. Para ello, se utilizan bandejas de tamaño normalizado DIN A2 a las cuales se les ha agregado un marco de madera en un caso y varillas de PVC en otro. Se utiliza el análisis de imágenes para realizar las comparaciones con bandejas de igual tamaño pero sin subdivisiones, además de realizar el análisis de resultados de las bandejas subdivididas.

3.2.3.1. Ensayo en Bandeja Subdividida con Marco de Madera

La bandeja utilizada de tamaño normalizado DIN A2 tiene la dimensión estándar de una hoja de papel de este formato de $0.25 m^2$ de superficie y cuyas dimensiones son $42.0 cm \times 59.4 cm$. Se ha utilizado una bandeja de este tipo sin ninguna modificación y otra idéntica sobre la cual se ha construido un marco de madera para subdividir la superficie tal y como se muestra en la Figura 3.27. El marco de madera está hecho con listones de aproximadamente $1 cm$ de grosor. Con el marco se han conseguido cuatro paneles de suelo de $2 cm$, $10.6 cm$, $13.6 cm$ y $28.2 cm$ de altura y todos ellos de $40 cm$ de ancho. El espesor de suelo en ambos casos es de $1 cm$.

La Figura 3.27 muestra el patrón de grietas obtenido al cabo de $8 días$ de secado en el laboratorio (*temperatura de $22^{\circ}C$ y humedad relativa del 56.5%*). Para hacer una comparación y buscar algún patrón se cuentan el número de celdas en cada panel y se comparan ambas bandejas.

Tabla 3.1 - Celdas en bandeja con subdivisiones

Panel	Nº de celdas de suelo por panel	Altura de la celda [mm]	Relación de lados de la subdivisión	Numero de franjas horizontales en la subdivisión	Numero de franjas verticales en la subdivisión
1	8	20	0.05	1	8
2	16	106	0.265	2	8
3	19	136	0.34	3	6-7
4	45	282	0.705	4-5	6-8

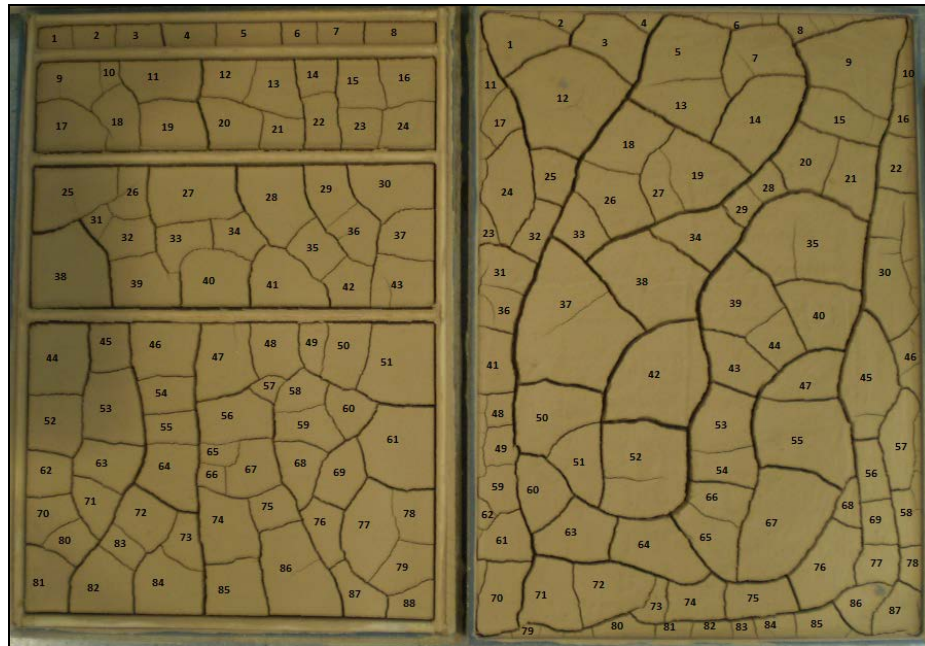


Figura 3.28 - Comparación de bandejas con y sin subdivisiones.
Los números indican el número de celdas en la bandeja.

Los marcos de madera han favorecido el desprendimiento del suelo de la primera bandeja. Aunque no era el objetivo de este ensayo analizar el efecto de las condiciones de contorno queda evidenciado que diferentes materiales (*madera y PVC*) presentan diferentes adherencias con el suelo en el proceso de desecación y esto influye ciertamente en el proceso de agrietamiento entre el borde de la bandeja en contacto con el suelo en desecación.

Como puede verse en la Figura 3.28 en la primera franja o panel, de menor altura, aparece sólo una fila de celdas. En la segunda dos, en la tercera 3, en la cuarta ya es difícil distinguir, pero podríamos decir entre 4 y 5.

En la bandeja con subdivisiones tenemos un total de 88 celdas, en la que no tiene subdivisión 87. Aunque se puede considerar que la numeración es un tanto arbitraria sobre todo en la bandeja sin subdivisión, es notable que el número de celdas sea tan parecido.

La Tabla 3.1 presenta un resumen de la morfología de agrietamiento dado en la bandeja con subdivisiones.

De la tabla y del ensayo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- a) En primer lugar la adherencia entre suelo y bandeja determina la configuración de las grietas de contacto entre estos dos materiales. La madera presenta una adherencia notoriamente menor que los bordes de la bandeja de PVC. Cuando existe gran adherencia como en el caso del PVC, los bordes presentan al final del ensayo celdas de pequeño tamaño que han quedado adheridas al borde de la bandeja.
- b) En segundo lugar, la relación de lados determina la configuración de las grietas en el sentido de que se dispondrán en números diferentes de franjas más o menos perpendiculares a los bordes. Las celdas finales tienen un tamaño bastante regular.

3.2.3.2. Ensayo en Bandeja Subdividida con Marco de PVC

Esta bandeja es idéntica a la del ensayo anterior pero las subdivisiones se han hecho con varillas de PVC autoadhesivas. En este caso la idea es investigar con mayor precisión el efecto de la relación de lados de la bandeja viendo las diferencias entre anchos de suelo en desecación que varían desde *1 cm a 11.5 cm* con una altura constante de *42 cm*.

Así se han obtenido anchos de *1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 11.5 cm* tal y como puede verse en la Figura 3.29.

Aquí nuevamente, a pesar de que no era el objeto del ensayo, se ve que al utilizar PVC la adherencia con el suelo es muy similar a la de la bandeja original por el hecho de que ésta es también de PVC. Queda en evidencia una vez más la importancia de las condiciones de contorno entre suelo y bandeja.

Como hay un predominio claro de una dimensión sobre la otra en todos los casos, existen unas grietas primarias que definen franjas de suelo horizontales como se puede ver en la Figura 3.30. Estas se pueden contar a simple vista para intentar encontrar algún patrón. Una observación detallada de la Figura 3.31, permite realizar los siguientes comentarios. En primer lugar, se observa que el número de celdas primero disminuye con el ancho de la porción de suelo hasta la porción 4 pero luego aumenta hasta la 9 (Tabla 3.2). Esto se debe a que las velocidades de secado son distintas precisamente por la diferencias de tamaño. Sin embargo la longitud total de grietas aumenta en cada porción lo cual es lógico teniendo en cuenta que a mayor superficie mayor energía disponible para agrietar el suelo.

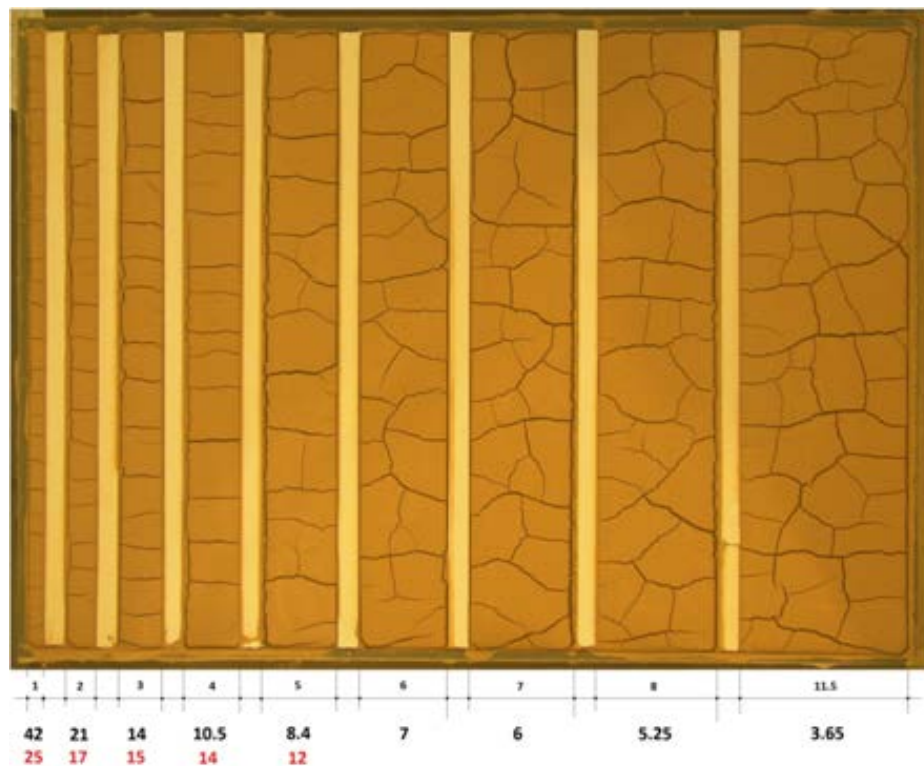


Figura 3.29 - Bandeja subdividida en 9 paños de altura constante. De arriba hacia abajo: ancho entre varilla, relación de lados de la porción y número de celdas.

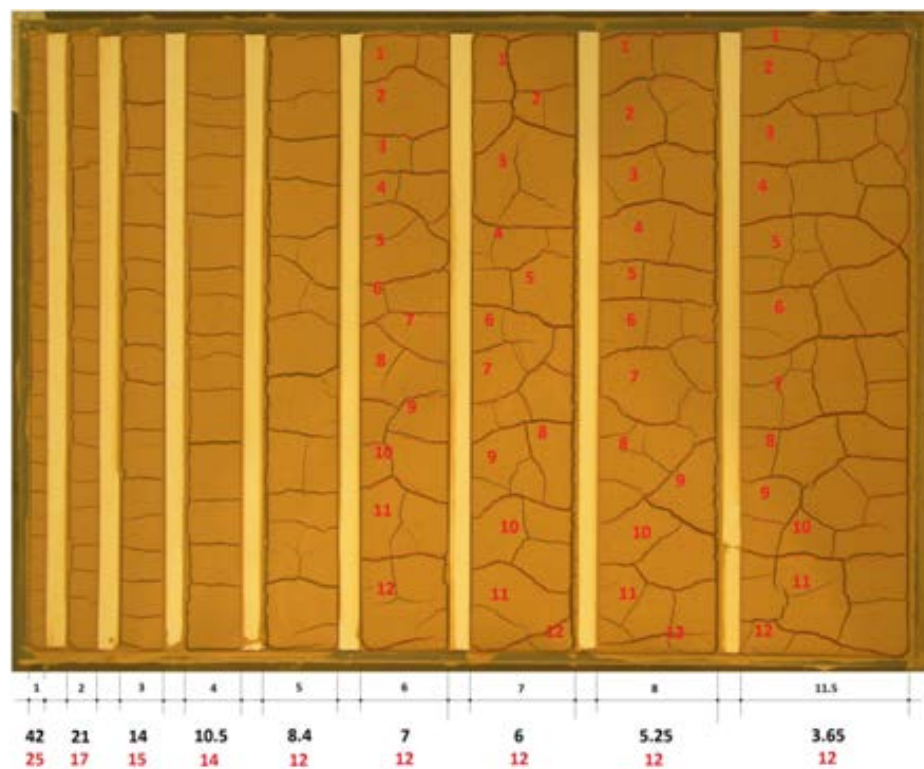


Figura 3.30 - Bandeja tamaño A2, 1 cm de espesor, 6 días de secado. De arriba hacia abajo: ancho entre varillas, relación de lados y número de franjas horizontales.

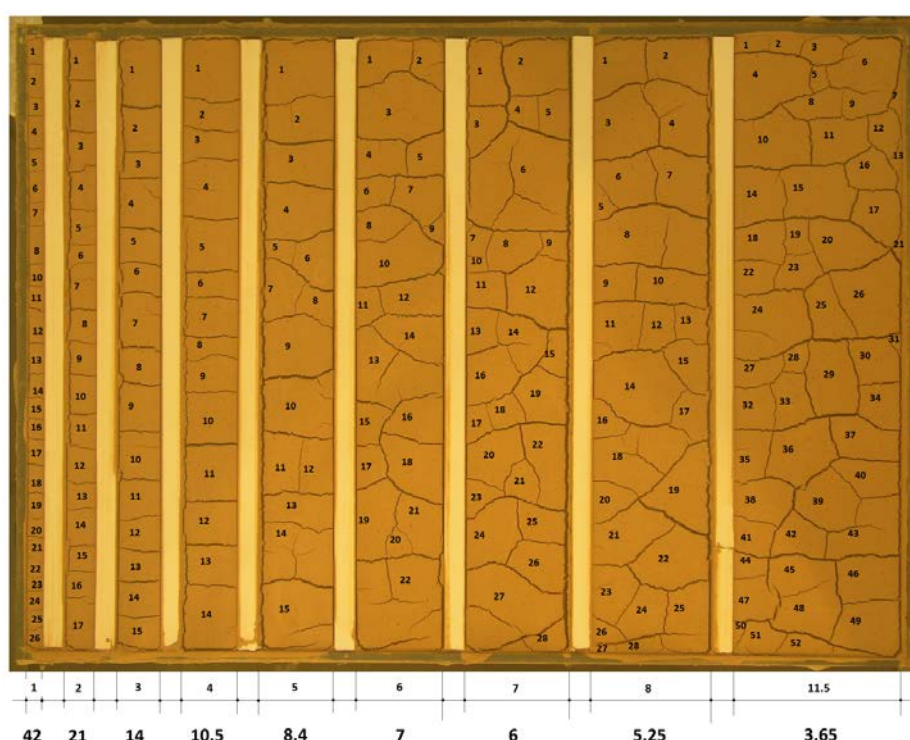


Figura 3.31 – Relación de lados de las 9 porciones y número de celdas de cada porción. 7.81% de la superficie son grietas, dimensiones en milímetros.

Tabla 3.2 – Morfología de las grietas en bandeja rectangular con subdivisiones

Porción	Nº de celdas	Longitud grietas [cm]	Área porción [cm ²]	Relación de longitud con la primera porción	Relación de área con la primera porción	Relación longitud de grieta y área de la porción [cm ⁻¹]
1	25	146	59.5	1	1	2.45
2	17	155	119	1.06	2	1.3
3	15	167	178.5	1.14	3	0.94
4	14	179	238	1.23	4	0.75
5	15	213	297.5	1.46	5	0.72
6	22	280	357	1.92	6	0.78
7	28	358	416.5	2.45	7	0.86
8	28	404	476	2.77	8	0.85
9	52	457	684.25	3.13	11.5	0.67

Del estudio de las bandejas rectangulares, se observa que la predicción de los patrones de grietas tiene una gran dificultad, dado que el proceso de desecación es un fenómeno físico que involucra una gran cantidad de factores que se interrelacionan haciendo difícil su análisis.

Se ha visto que existe un efecto del tamaño (Lakshmikantha, et al., 2009), y queda claro que la relación de lados también influye en el patrón final de agrietamiento. Se ha evidenciado la influencia del tamaño de partículas inicial. También se ha demostrado en la literatura la influencia

de la velocidad de secado, del contenido de agua inicial, etc. A lo largo de este capítulo se ha visto también que la temperatura tiene influencia, así como también la adherencia entre el material de los recipientes y el suelo.

En definitiva, en ensayos de este tipo donde la geometría es relativamente sencilla es necesario el diseño de nuevos experimentos que quiten variables al problema para poder interpretar de una manera más clara como se produce el fenómeno.

El desarrollo de experimentos sencillos, permitirá tener éxito en las simulaciones que serán también más sencillas. Es necesario, reducir el número de grietas obtenidas en los ensayos para poder simularlas con mayor facilidad. Intentar simular un patrón de grietas como los obtenidos en los ensayos de este apartado resulta extremadamente complejo.

Como se verá en el capítulo de simulaciones, el análisis no debe centrarse solo en la masa de suelo sino también en su interacción con la atmosfera y con los contenedores en el laboratorio. En el caso de los procesos en el campo, la variación de las variables atmosféricas es mucho más agresiva y difícil de controlar y medir. Por lo tanto los modelos en esos casos serán más complejos aún.

3.3. Ensayo en Bandeja Circular Sometida a Secado Rápido

Con el propósito de estudiar el efecto de la velocidad de secado y la temperatura en muestras de suelo, se procedió al secado de una muestra con la máxima velocidad que la CA permite (45°C , $HR\ 30\%$). Para ello se acercaron todo lo posible las lámparas halógenas y se las dispuso como se muestra en la Figura 3.32. De esta forma se imponen dos focos de secado contrapuestos obligando a la humedad del suelo a migrar en dos direcciones.

Para el ensayo se ha utilizado el mismo suelo que para el resto de los ensayos presentados en esta tesis, la arcilla roja de Barcelona, así como el mismo proceso de preparación de la muestra descrito anteriormente. El tamaño de la muestra es en este caso la que determina una bandeja circular (*12,57 litros*) de *40 cm de diámetro por 10 cm de altura* construida en PVC.

La duración del ensayo ha sido de *6 días*. Las primeras grietas se apreciaron a las *24 horas* de iniciado el ensayo y se produjeron en los bordes donde el suelo estaba en contacto con la bandeja contenedora. En el segundo día de ensayo se observó el inicio de la grieta central en la zona media de la bandeja. Esta grieta se propagó posteriormente desde el centro y hacia los bordes de la muestra.

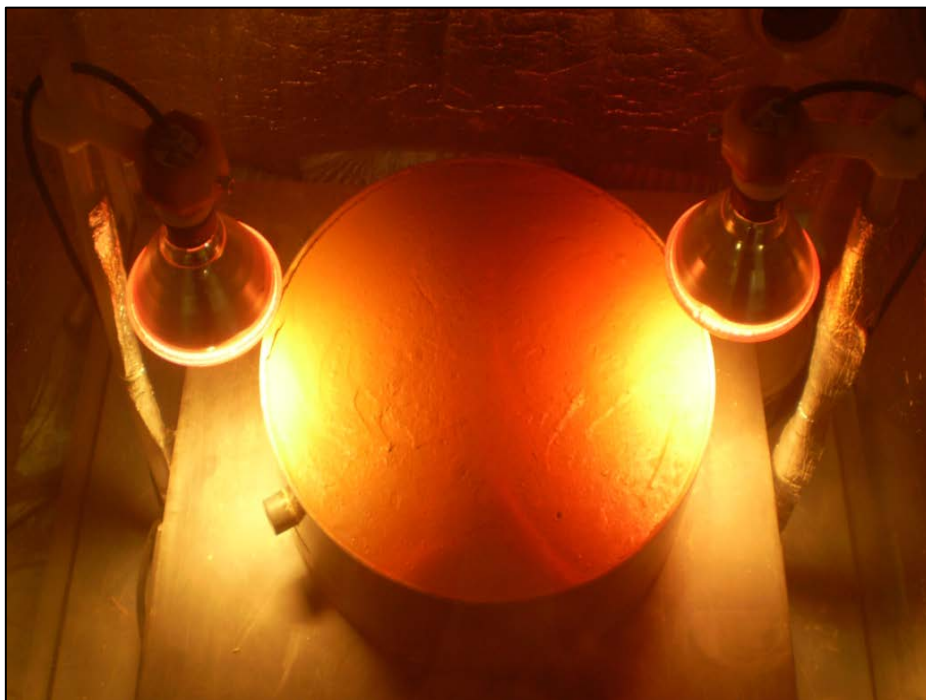


Figura 3.32 - Muestra de suelo 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura sometida a secado rápido

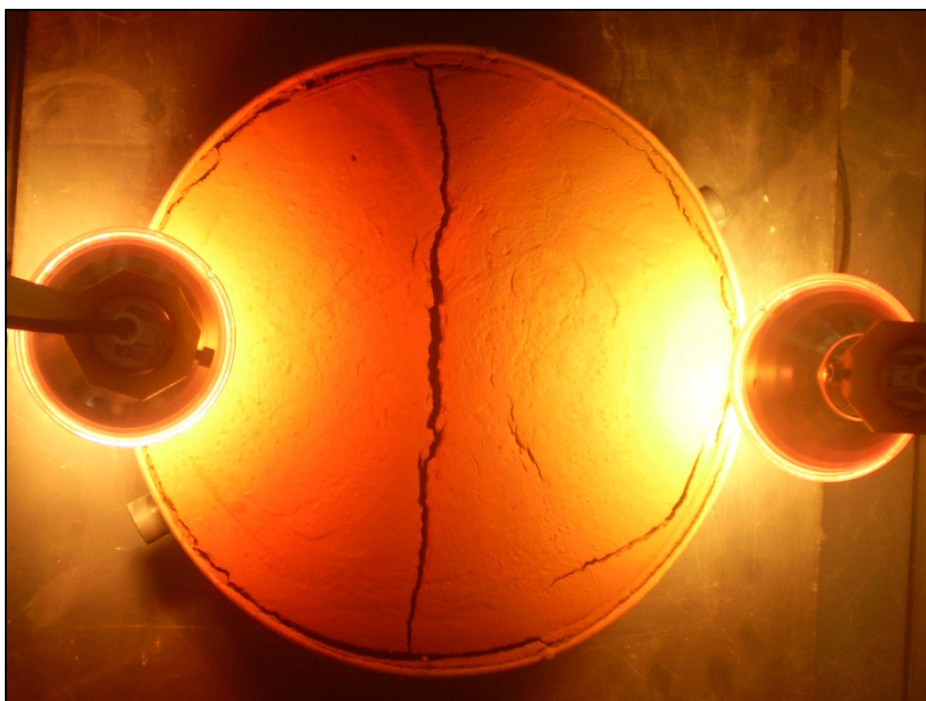


Figura 3.33 – Grieta central en Muestra de suelo 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura sometida a secado rápido



Figura 3.34 – Aspecto al final del ensayo, cara superior



Figura 3.35 – Aspecto al final del ensayo cara inferior



Figura 3.36 – Mediciones de la deformación en la muestra desecada



Figura 3.37 – Grietas desde el fondo que no progresaron hasta la superficie

La contracción en este ensayo fue mucho más brusca que en los ensayos más lentos. Aparentemente hay mayor adherencia con las paredes de la bandeja, pero a pesar de ello las primeras fisuras son de despegue respecto de dicha bandeja.

La aplicación simétrica de la temperatura produjo una grieta transversal que divide a la muestra en dos mitades debido a que es en el sector central donde la muestra está más húmeda y por lo tanto tiene menor resistencia a tracción. Esta grieta central atraviesa todo el espesor de la muestra de suelo. En la Figura 3.34 se observa el aspecto final de la muestra. Se observa una considerable contracción que se debe principalmente a las grietas producidas entre la bandeja y el suelo. En la mitad derecha la adherencia con la bandeja ha sido mayor lo cual produjo una grieta semi-circular paralela al borde.

En la Figura 3.35 se puede observar el aspecto de la parte inferior al final del ensayo. Como era de esperar, el patrón de agrietamiento en esta cara es más complejo que el de la cara superior. La interacción con el fondo rugoso y otros efectos que no ha sido posible identificar totalmente, producen un patrón de agrietamiento complejo y con grietas que describen círculos en ambas mitades separadas por la grieta primaria central. La influencia de las condiciones de contorno es evidente al comparar con la Figura 3.21, correspondiente a una bandeja de fondo liso.

En la Figura 3.36 se muestra la técnica para medir la deformación vertical. Se ha medido una deformación de *17 mm* en la zona central contra *15 mm* en los bordes. La diferencia se debe a que las grietas en los bordes se producen antes propiciando la desecación de manera más rápida en paralelo con el hecho de que las lámparas halógenas se encontraban concentradas en los dos extremos. El secado rápido produce endurecimiento del suelo por pérdida de humedad. Posteriormente se produce la grieta central que también ocasiona un aumento de la velocidad de secado en esta zona pero en todos los casos el suelo en la zona central está más húmedo y por lo tanto es más blando.

En la Figura 3.37 se observa además un efecto de flexión que parece ser el responsable, al menos en parte, de las grietas que se propagan desde el fondo pero que no alcanzan a superar la mitad del espesor de la muestra. Otro detalle en este caso es que la única grieta vertical es la grieta central. Las grietas laterales, que se inician desde arriba, cerca de los bordes de la bandeja tienden a desviarse hacia el centro de la muestra. Las grietas que se inician desde el fondo se desvían hacia los laterales.

Este ensayo muestra que la temperatura puede ser una variable a tener en cuenta y que afecta de modo apreciable el comportamiento bajo desecación. Aunque en esta tesis no es una variable fundamental, puede ser necesaria su inclusión en futuras investigaciones.

3.4. Ensayo de Secado, Humedecimiento e Inundación en la Cámara Ambiental

La metodología de trabajo y equipos utilizados en este ensayo, representan una mejora de los equipos utilizados por Lakshmikantha (2009), que constaba de una CA con control de temperatura y humedad para realizar ensayos de desecación. Con el nuevo equipo, se ha realizado un ensayo de secado, posterior humedecimiento, inundación, secado y nuevo humedecimiento en la CA adaptada con temperatura y humedad relativa controladas. Se han tomado fotografías desde arriba de la cámara a intervalos regulares de una hora. Además, durante el ensayo se ha auscultado la muestra de suelo con un sistema de Georadar para detectar posibles grietas internas, invisibles en superficie, durante el proceso.

El principal objetivo de este ensayo fue avanzar en las posibilidades de control del equipamiento de que se dispone y comprobar que permite efectuar cambios en las condiciones ambientales no solo en desecación sino también en humedecimiento e inundación.

La muestra de suelo de *80 cm de diámetro y 10 cm de altura (50,27 litros)* se ha instrumentado con 6 tensiómetros T5X³ para medir la succión, 3 células de carga para medir la evolución del contenido de agua y 3 sensores Decagon⁴ para medir la temperatura del suelo. La duración total del ensayo ha sido de *50 días* y para su análisis se consideran cinco etapas. Las Figura 3.42, Figura 3.43 y Figura 3.44, muestran la evolución del aspecto de la probeta durante todo el ensayo mediante fotografías tomadas de la cara superior de la muestra. La Figura 3.45 muestra la evolución durante el proceso de la temperatura del suelo en dos puntos. La Figura 3.46, muestra la evolución de la succión en 6 puntos de la probeta que se identifican en la Figura 3.38 (T1 a T6). La Figura 3.47, presenta la evolución de la temperatura y la humedad relativa de la CA medidas con el sensor de un humidostato. La Figura 3.48, muestra la evolución del peso de la probeta a medida que avanza el ensayo mediante el uso de 3 células de carga. Los tensiómetros se distribuyeron de la siguiente manera (Figura 3.38): 6 tensiómetros T5X, T1 y T2 a *5 cm* des-

³ Los tensiómetros T5X son sensores que miden succión con un rango de entre 100 y -200 kPa aproximadamente. <http://www.ums-muc.de/en/products/tensiometer/t5.html>

⁴ Los sensores Decagón son sensores que miden temperatura, contenido volumétrico de humedad y conductividad eléctrica del suelo. <http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/>

de la base de la bandeja, T3 a 6 cm desde la base, T4 a 3 cm desde la base, T5 a 4 cm desde la base y T6 a 2 cm desde la base. En la Figura 3.46, se observan las mediciones de los tensiómetros en 6 colores diferentes: T1 azul, T2 rojo, T3 amarillo, T4 verde, T5 marrón y T6 negro. Los 3 sensores Decagon (D1 a D3) se dispusieron tal como se indica en la figura. La lectura de uno de ellos se ha descartado por dar valores incoherentes.

3.4.1. Descripción de las Mejoras Hechas al Equipo de Laboratorio

En la tesis doctoral de Lakshmikantha (2009), se ha presentado un equipo para estudiar la desecación en suelos. Este equipo constaba de una CA, un deshumidificador conectado a dicha cámara, tres células de carga, un equipo de adquisición de datos para obtener lecturas de hasta 6 tensiómetros T5X para medir succión, dos sensores Vaisala para medir humedad relativa del suelo y temperatura, dos lámparas halógenas para control de temperatura de la cámara, cámara fotográfica de alta definición para tomar imágenes de las muestras. Finalmente disponía de un ordenador y software para control del dehumidificador, las lámparas y la adquisición de imágenes.

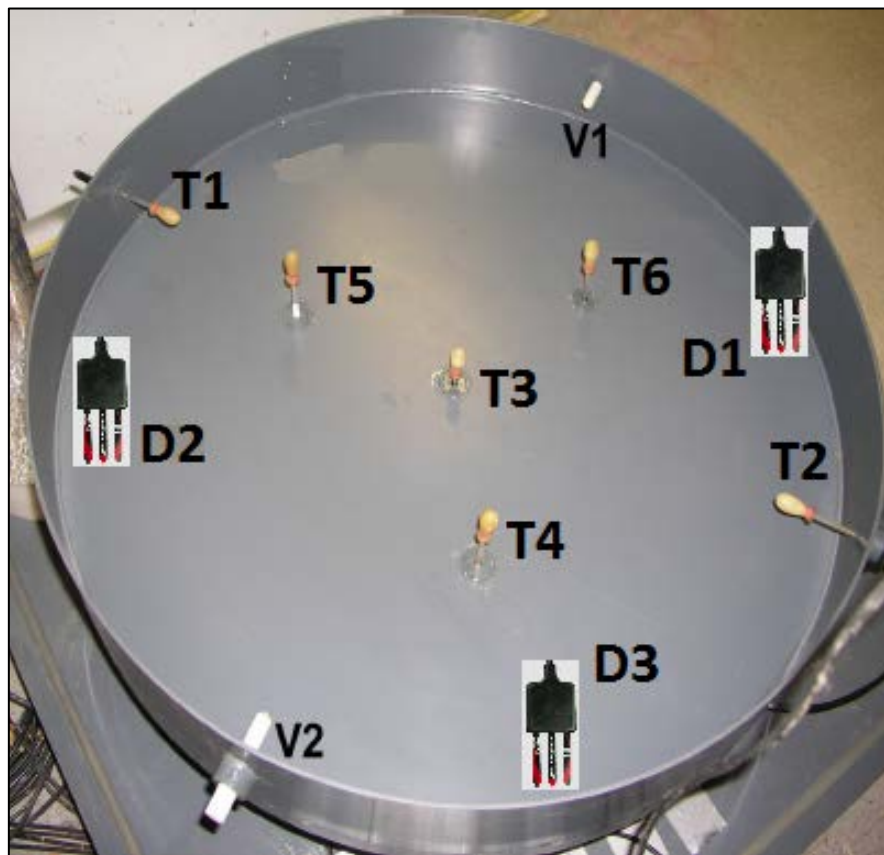


Figura 3.38 - Instrumentación de la muestra de suelo sometida a ciclos de secado y humedecimiento. 80 cm de diámetro × 10 cm de altura (50,27 litros).



Figura 3.39 - Humidificador conectado a la Cámara Ambiental

Respecto del equipo anterior, se han agregado un humidificador para someter a las muestras a ciclos de humedecimiento y un humidostato para poder controlar tanto el nuevo humidificador como el deshumidificador existente. Se han utilizado tres sensores Decagon y su correspondiente datalogger para monitorizar la temperatura del suelo. La Figura 3.39 muestra el humidificador con su conexión a la CA. La Figura 3.40 muestra el humidostato y el datalogger de los sensores Decagon. La CA mejorada se muestra en la Figura 3.41.

Para el secado se ha fijado una temperatura de 28°C y una humedad relativa del 30%. En las Figura 3.42, Figura 3.43 y Figura 3.44 se observa la evolución del aspecto de la superficie de la muestra en desecación. Durante las primeras *24 horas* del ensayo, se ha observado que una capa de agua asciende a la superficie de la muestra. El agua queda retenida en el seno del suelo durante el proceso de amasado y asciende a la superficie al poner el suelo en reposo. Como es lógico, esta agua es la primera que se evapora.



Figura 3.40 – Nueva instrumentación de la Cámara Ambiental: **Izquierda:** humidostato que controla el humidificador y deshumidificador. **Derecha:** datalogger de los sensores Decagon.



Figura 3.41 – Cámara Ambiental mejorada con equipamiento para humidificación: *Humidificador, humidostato y tubo evaporador.*

La primera grieta visible apareció a los *10 días* de ensayo en el cuadrante superior derecho de la muestra (Figura 3.42, día 10).

Si observamos la Figura 3.46, donde se presenta la evolución de la succión con el tiempo, vemos que en esta etapa se presenta la típica curva de succión en función del tiempo. Se ve como la pendiente de succión, siempre positiva, va aumentando hasta el final de este tramo de ensayo.

3.4.2. Desarrollo del Ensayo y Descripción de las Distintas Etapas

En el caso de este ensayo, se describen y analizan en primer lugar los detalles del ensayo en sus distintas etapas relativos a los datos recogidos por la instrumentación. Posteriormente, se analiza y describe la morfología de las grietas y su evolución a lo largo del proceso.

3.4.2.1. Primera Etapa (Secado, 14 días)

Durante todo el ensayo se han tomado como referencia de tiempo cada uno de los días en los que se ha desarrollado dicho ensayo. Se debe tener en cuenta que el primer día solo dura *12 horas y 30 minutos* ya que el proceso ha comenzado a las *11:30 AM*.

En esta primera etapa se han evaporado aproximadamente *12 litros* de agua como puede comprobarse en la Figura 3.48 donde se presenta la evolución del peso de la muestra de suelo ensayada. En esta misma figura se muestran los tiempos a los que se ha procedido a auscultar la muestra con el sistema Georadar. Estos instantes están claramente detectados por las células de carga, puesto que al apoyar el sistema Georadar sobre la placa de metacrilato, aquéllas detectan un aumento de peso.

En la Figura 3.47 se observa la evolución de la temperatura en la CA con el tiempo. En las primeras horas se observa una fluctuación de la temperatura hasta que al cabo de un par de días se logra la estabilidad alrededor de los 28°C . A partir de este momento en la CA se ha mantenido una temperatura de 28°C con lo cual podemos decir que la muestra estaba en equilibrio térmico con el ambiente.

No se observan cambios apreciables en los datos instrumentales que puedan determinar el inicio de las grietas ni su influencia en el proceso de secado.

3.4.2.2. Segunda Etapa (Humedecimiento, 5 días)

Se ha procedido al humedecimiento de la muestra aumentando la humedad relativa del ambiente de la cámara al 80%. La temperatura se ha mantenido constante a 24°C. La razón del cambio de temperatura fue para comprobar si dicho cambio afecta de manera apreciable a la temperatura del suelo.

En la Figura 3.46 se observa un punto de inflexión en las curvas de succión obtenidas de los tensiómetros en el momento que se varían bruscamente las condiciones ambientales a la que estaba expuesto el suelo. Se observa una pendiente casi constante bastante inferior a la que tenía en la etapa inmediata anterior de secado. El punto de inflexión muestra el momento exacto en que las condiciones de humedad ambiente cambian lo cual permite comprobar que los tensiómetros son sensibles a estos cambios y permiten advertir cuando cambian las condiciones ambientales midiendo la succión en el suelo.

El objetivo de esta fase del ensayo es ver cómo afecta a la succión el cambio en la humedad de la cámara. En los pocos días que se ha mantenido el ambiente con alto contenido de humedad no se ha apreciado cambios en la configuración de las grietas presentes, aunque la succión ha aumentado.

En esta etapa la pérdida de agua de la muestra ha sido casi nula lo cual es una forma de comprobar que existe un equilibrio de humedades entre muestra de suelo y ambiente. Es decir, no parece haber intercambio de humedad entre el ambiente y la muestra de suelo. Sin embargo, la succión sigue aumentando probablemente debido a cambios internos en la distribución del agua en la masa de suelo, o bien se debe a que la respuesta de los tensiómetros es relativamente lenta.

En esta etapa se observa además una bajada de la temperatura que se corresponde con la bajada de temperatura aplicada a la cámara, ver Figura 3.45 y Figura 3.47, lo cual indica que la muestra de suelo tarda poco tiempo (algunas horas) para llegar al equilibrio térmico con el ambiente. Esto evidentemente para los rangos de variación de las variables de este ensayo en particular (*de 28°C a 24°C*).

3.4.2.3. Tercera Etapa (Inundación, 3 días)

En esta etapa se estudia qué sucede en la naturaleza cuando sobre un suelo agrietado por desecación incide una cierta precipitación. Para ello se aporta a la muestra semi-seca 9 litros de agua que es lo que permite el espacio entre grietas y la capacidad de la bandeja. Puede verse la muestra inundada en la Figura 3.43 el día 21.

Al principio del ensayo, el agua había emergido a la superficie, llenando por completo el recipiente puesto que el suelo en estado de lodo semifluido también se había depositado hasta enrasar la bandeja. Para la inundación solo ha sido necesario agregar *9 litros* de agua, con lo cual tenemos una diferencia de *3 litros* respecto de los *12 litros* de agua perdidos por desecación. Esto se explica porque el flujo de agua en el seno del suelo parcialmente saturado es un proceso lento y si quisiéramos poder agregar los *3 litros* de agua adicionales deberíamos esperar un largo periodo de tiempo o bien entregar energía al sistema mediante por ejemplo mezclado mecánico.

Cuando el agua entra en contacto con el suelo, se produce un flujo y penetración en una delgada zona desde la superficie y entre las grietas existentes haciendo que el estado tensional debido a la succión cambie de manera brusca y se llega a la condición de fractura, puesta en evidencia por la aparición de nuevas grietas, especialmente en los bordes de las grietas existentes.

Se mantuvieron estas condiciones de humedad y temperatura durante *2 días y medio*, hasta que ya no hubo cambios en el patrón de agrietamiento y se procedió a poner en marcha la siguiente etapa. Durante este tiempo se ha mantenido la humedad relativa del ambiente en valores cercanos al *80%* (ver Figura 3.47).

3.4.2.4. Cuarta Etapa (Segundo Secado, 11 días)

El segundo semi-ciclo de secado se produjo con valores de *temperatura de 24°C y humedad relativa del 30%*.

Si comparamos los semi-ciclos de secado de la primera etapa y de esta última vemos que, en primer lugar, para alcanzar un valor de succión de aproximadamente *30 kPa*, en la primera etapa ha sido necesario un tiempo de *15 días* (ver Figura 3.46). En esta cuarta etapa en cambio fueron necesarios tan solo *11 días*, incluso habiendo fijado una temperatura del ambiente *4°C* inferior al primer secado. Además, se puede ver que la pendiente de aumento de succión al final de esta etapa es notablemente mayor y constante.

Respecto de la primera fase de ambas etapas, donde se ve que la succión permanece más o menos constante y cerca de *0 kPa*, es más corta (*7 días*) en la primera etapa de secado y más larga en la segunda (*9 días*). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la primera vez que se ha secado la muestra las condiciones de temperatura y humedad de secado se han impuesto desde el principio, mientras que en la etapa actual se ha producido un período de tiempo de transición con humedad relativa del ambiente alta.

Esta etapa de secado es esencialmente distinta puesto que el agua no ha penetrado en el suelo como en el caso de la primera etapa. Además, en la primera etapa el suelo está sano, en cambio, en la cuarta etapa el suelo está agrietado desde el inicio del proceso de secado.

Un hecho notable es que debido a la inundación la muestra se ha degradado notablemente. Han aparecido nuevas grietas junto a las ya existentes. Comprobamos así que el proceso de agrietamiento es irreversible al menos en períodos cortos de tiempo. Además de irreversible el hecho de devolver agua al sistema produce más agrietamiento aún. Esto indica que al menos al principio, devolver agua al sistema desecado produce cambios en las tensiones del suelo que favorecen la aparición de nuevas grietas. Evidentemente, la inundación produce cambios bruscos en los perfiles de succión en una costra de suelo que inducen al agrietamiento.

3.4.2.5. Quinta Etapa (Segundo Humedecimiento, hasta el Final del Ensayo)

Una vez que se llega a un estado de desecación superior a la primera etapa de secado, se procede a humidificar el suelo y se deja evolucionar el ensayo hasta el final de los *50 días* previstos. Esta vez la humedad relativa del ambiente se mantiene al *75% de humedad y la temperatura a 22°C*. Las lecturas de los tensiómetros (Figura 3.46) muestran como la succión va decreciendo lentamente puesto que las condiciones ambientales así lo inducen. En la Figura 3.45 vemos nuevamente como la muestra de suelo entra en equilibrio con el ambiente bajando su temperatura a valores similares a la cámara.

También se comprueba que tres de los tensiómetros muestran una menor velocidad de cambio debido a las nuevas condiciones ambientales distintas de la primera etapa de secado y humedecimiento (T3, T4 y T6).

El tensiómetro T2 parece haber cavitado y sus lecturas ya no son fiables. Algo similar ocurre con los tensiómetros T5 y T1 puesto que las lecturas que venían siendo similares en todos ellos presentan ahora una gran discrepancia. Sin embargo, curiosamente, estos tensiómetros están justo en lugares donde hay grietas y puede que estén expuestos directamente al ambiente y no en contacto con el suelo como lo están los tensiómetros T3, T4 y T6.

3.4.2.6. Resultados de la Auscultación con Georadar

En el apartado 3.1 de este capítulo, se presenta una tecnología de Georadar que se ha utilizado en esta investigación para la auscultación del suelo durante procesos de desecación. El equipo ha demostrado su capacidad de detección de grietas de unos milímetros de espesor aunque grietas capilares de poco tamaño por ahora resultan indetectables con esta tecnología.

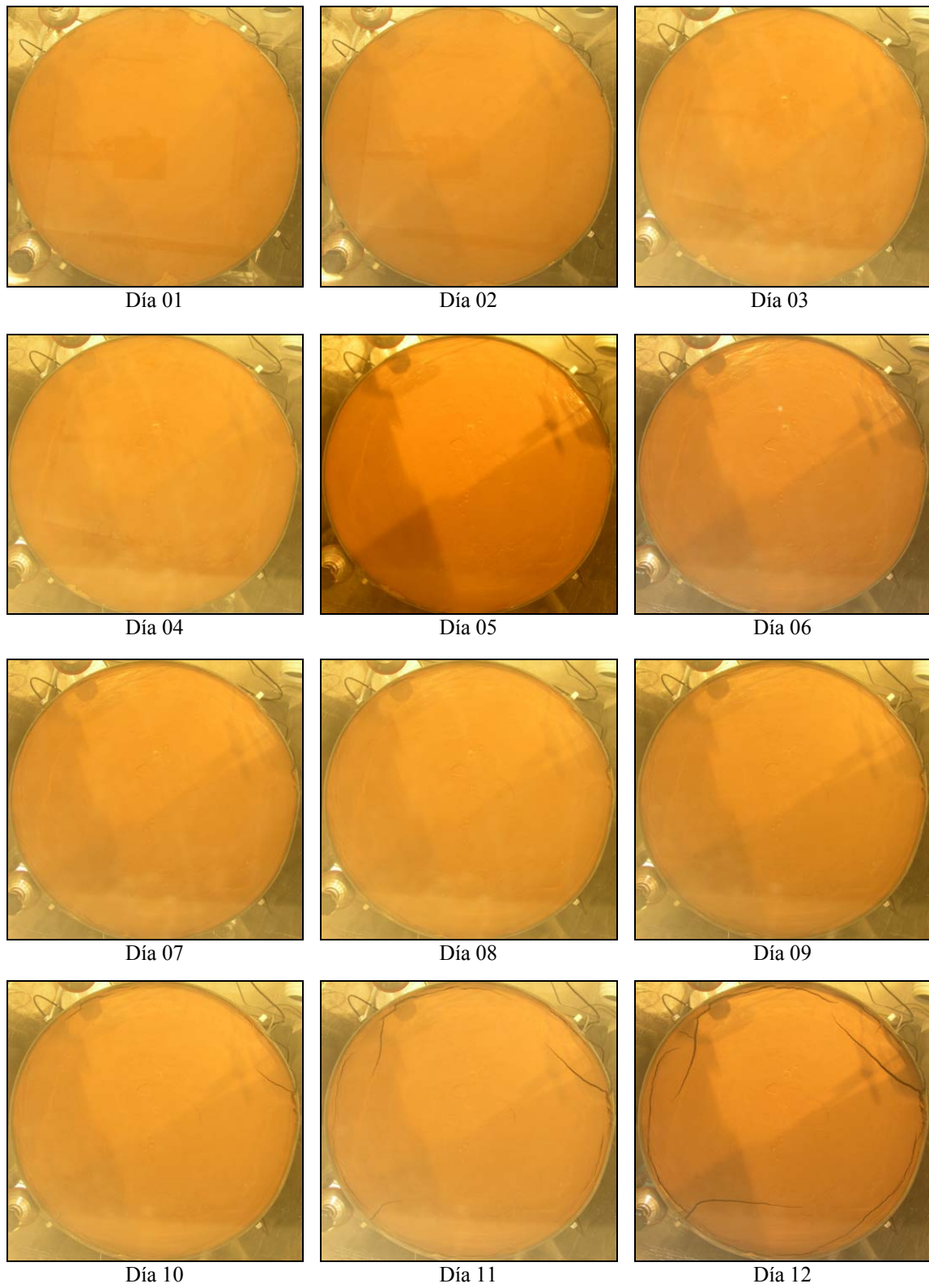


Figura 3.42 - Primeros 12 días de desecación en Cámara Ambiental. *Dos auscultaciones con GPR y aparición de la primera grieta visible en superficie.*

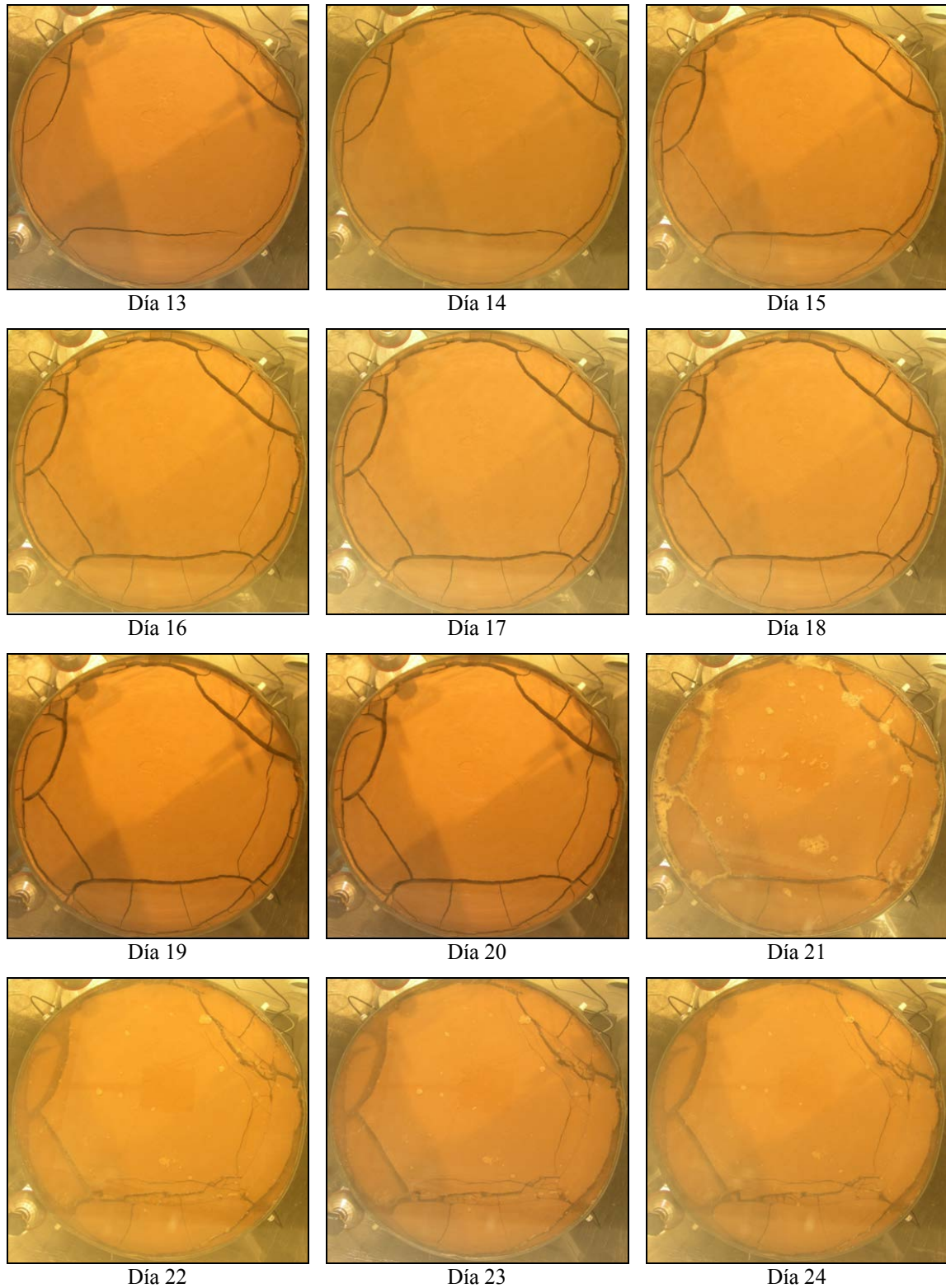


Figura 3.43 - Desección, humedecimiento e inundación de la muestra de suelo. *Auscultación con GPR números 3 y 4. Grietas debido a inundación.*

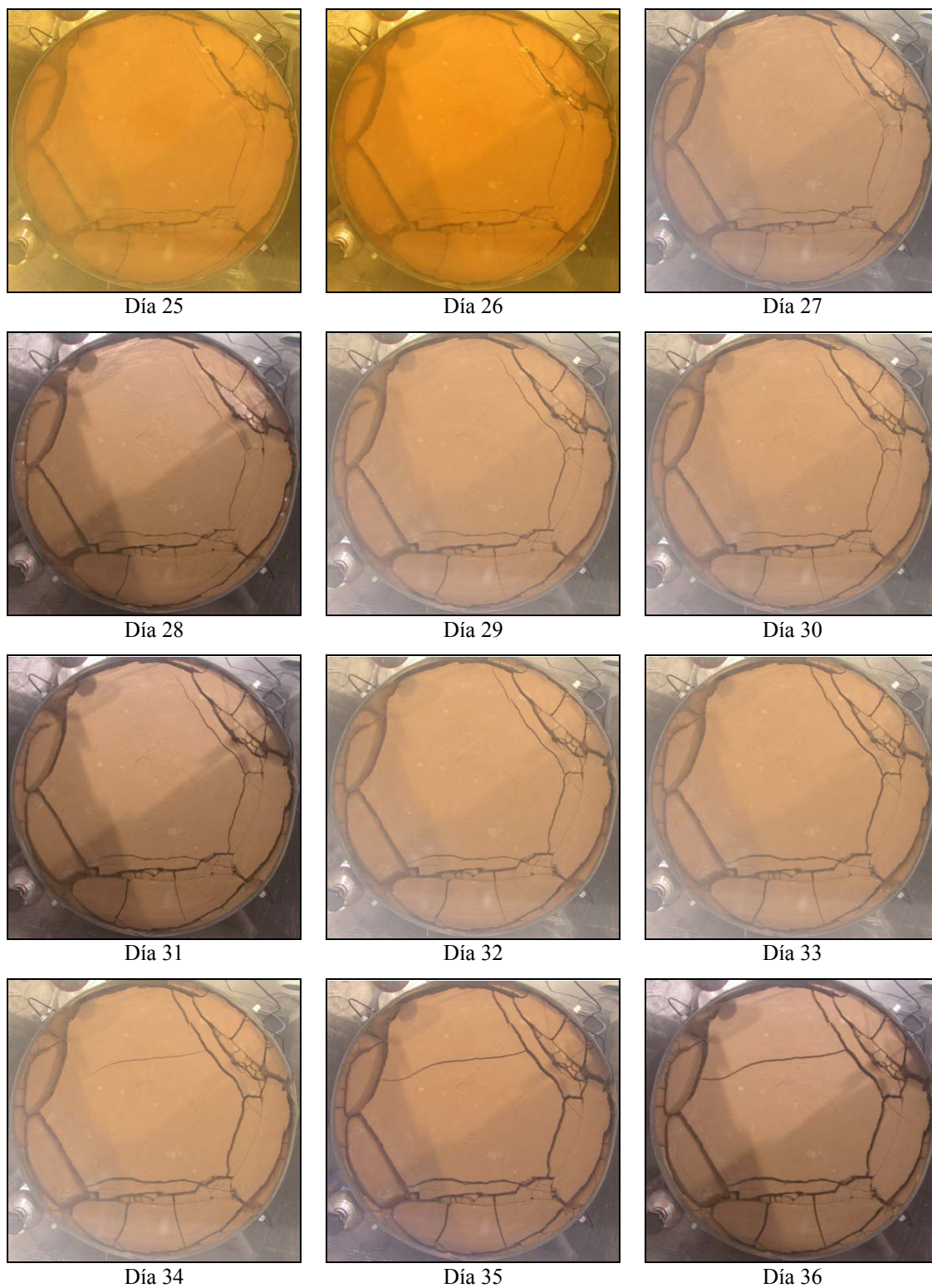


Figura 3.44 - Última etapa de desecación

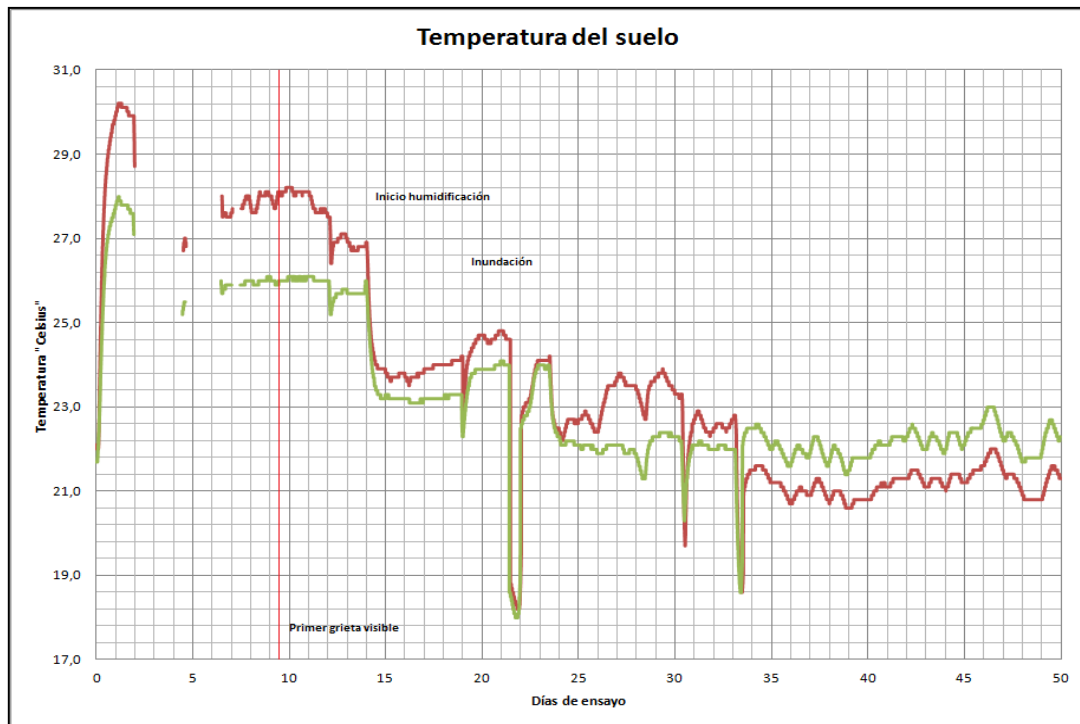


Figura 3.45 - Temperatura en el suelo medida con sensores Decagon.

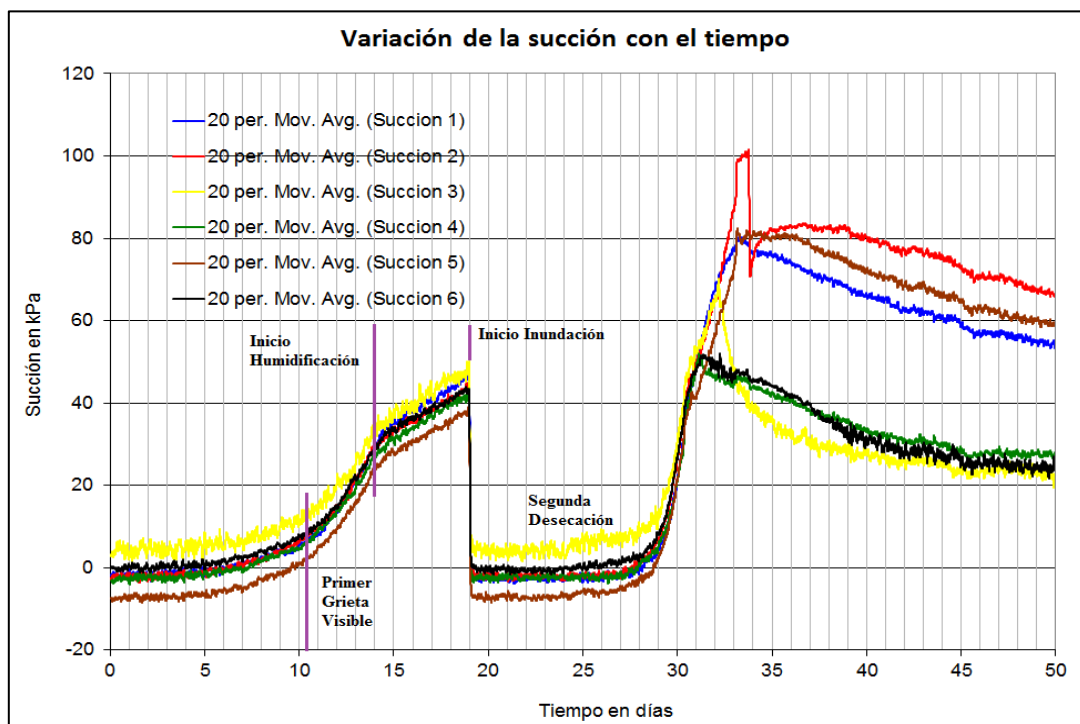


Figura 3.46 - Medidas de succión mediante tensiómetros T5x

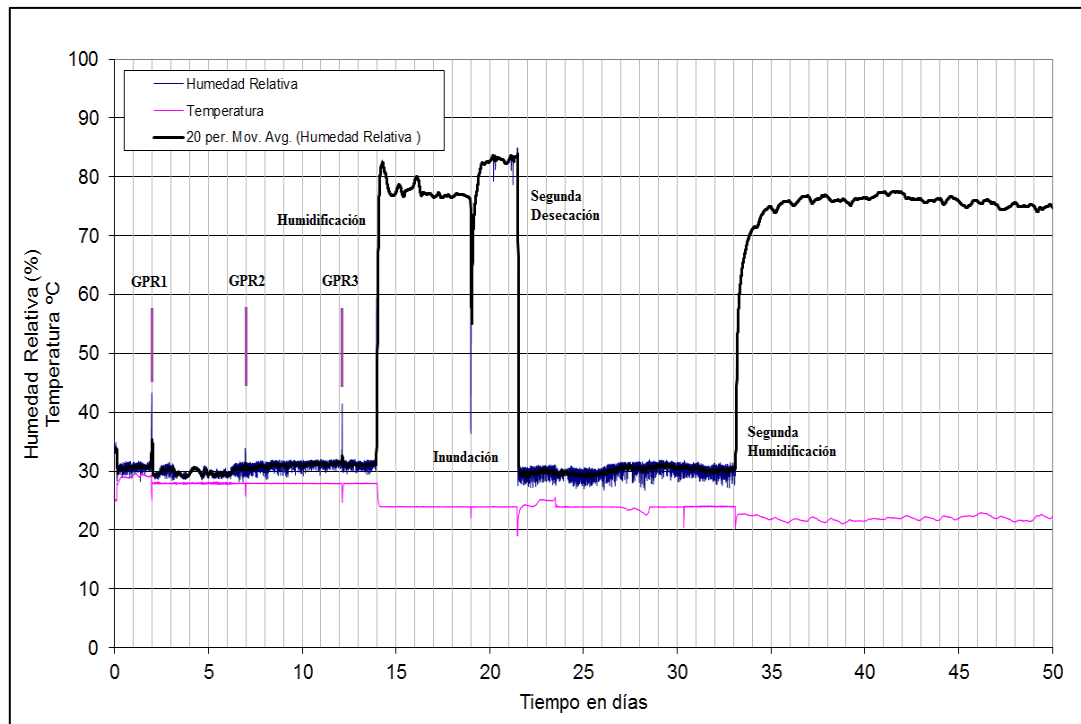


Figura 3.47 - Humedad relativa y temperatura del ambiente

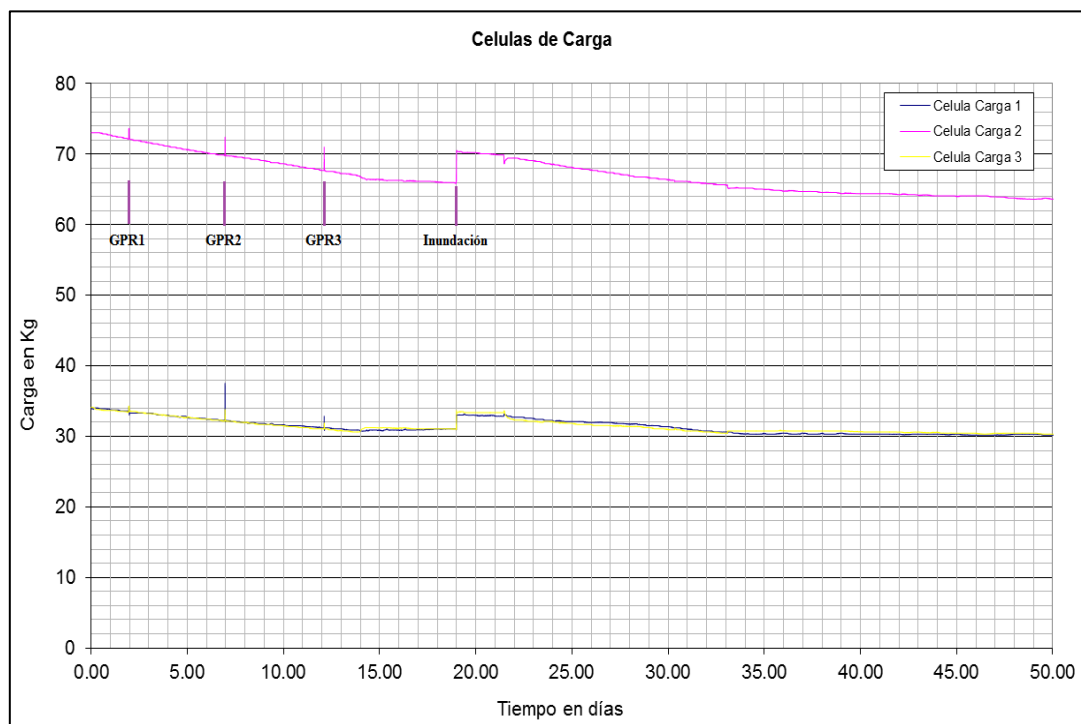


Figura 3.48 - Medición de las células de carga

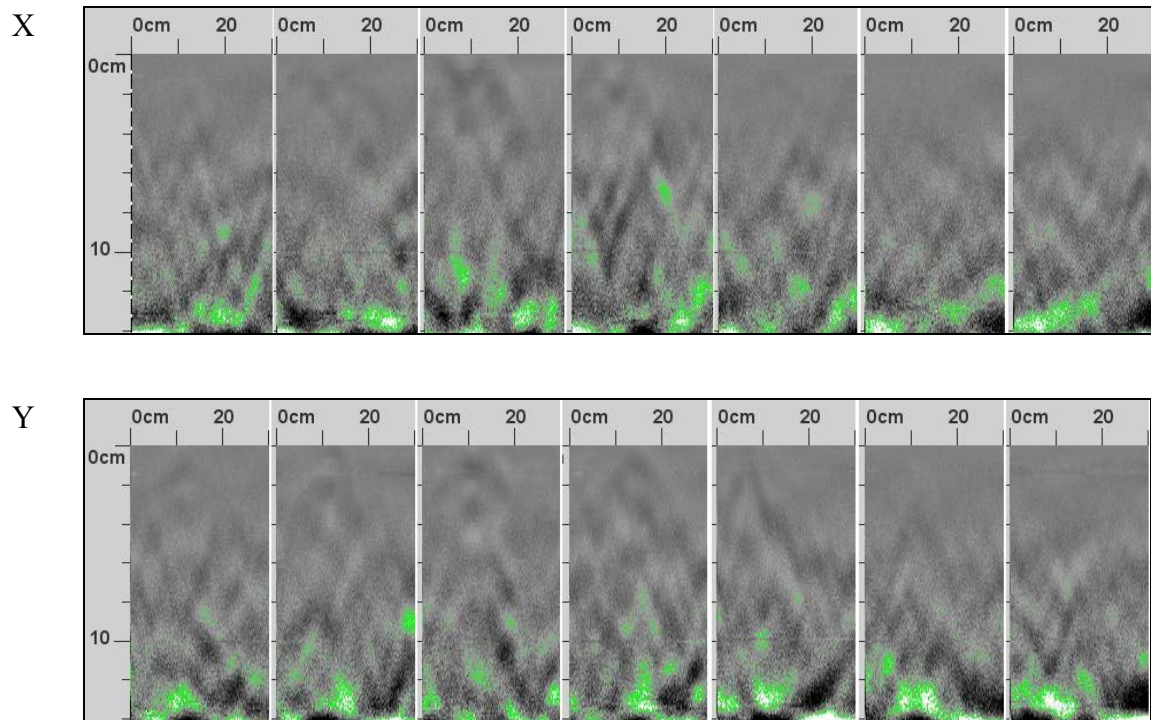


Figura 3.49 - Resultado de auscultación con georadar – GPR1 - Día 3

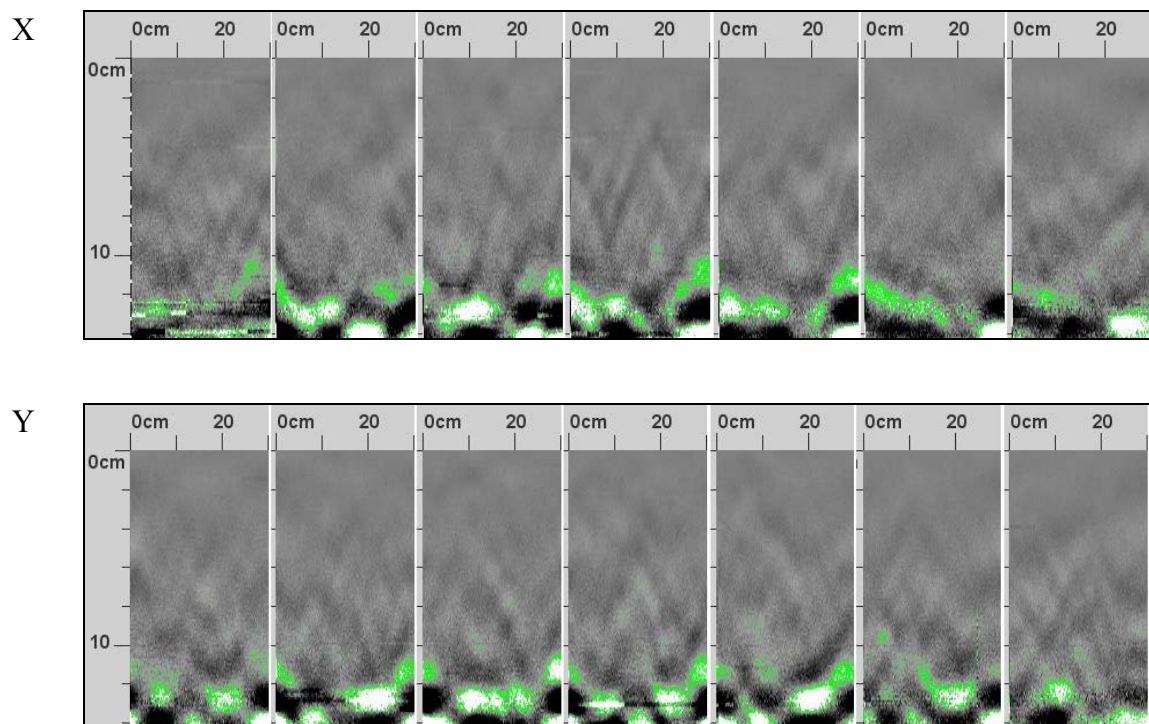


Figura 3.50 - Resultado de auscultación con georadar – GPR2 - Día 9

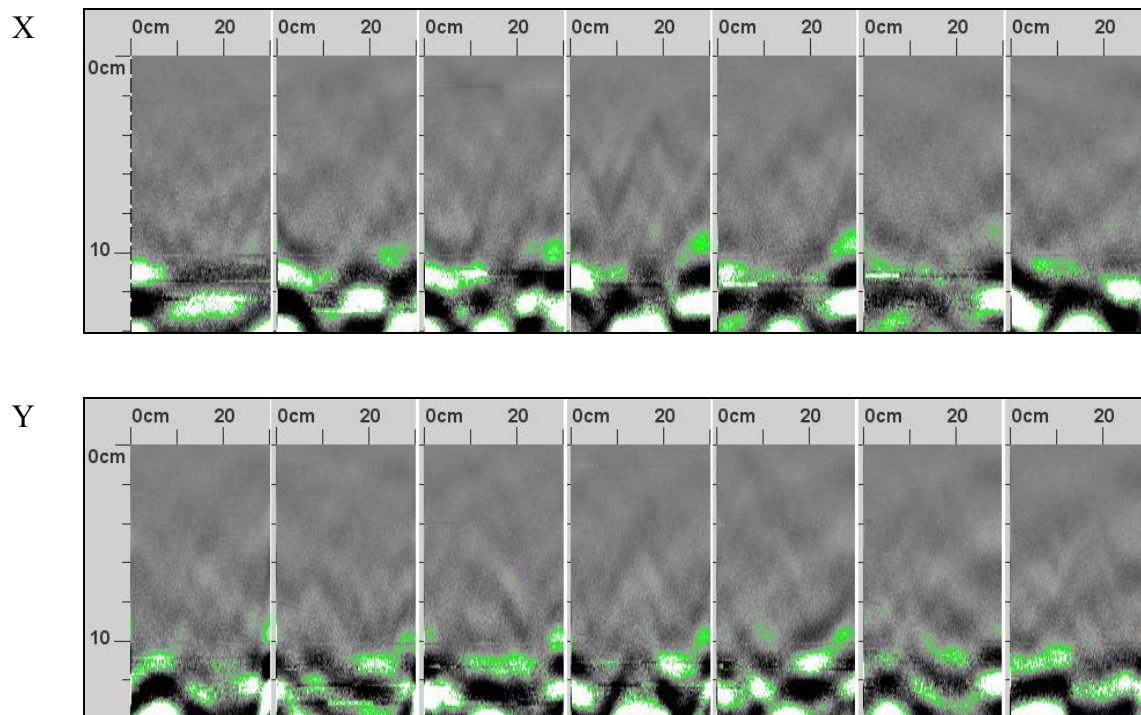


Figura 3.51 - Resultado de auscultación con georadar – GPR3 - Día 14

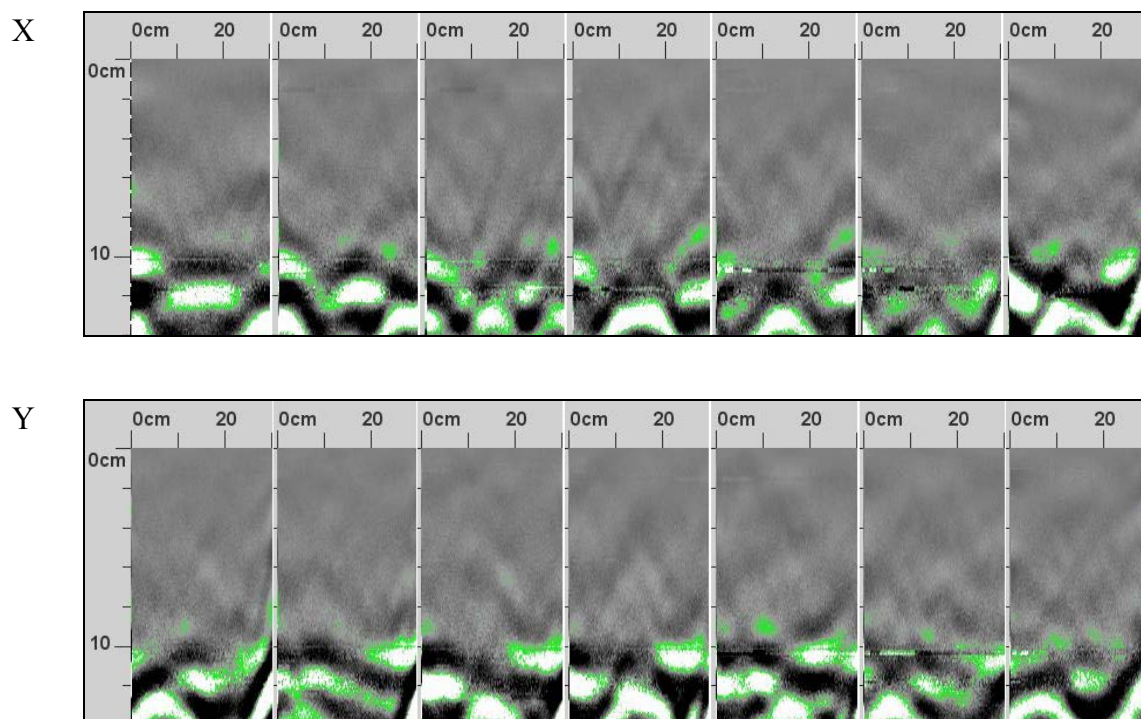


Figura 3.52 - Resultado de auscultación con georadar – GPR4 - Día 20

En el caso particular de este ensayo, no se han producido grietas por debajo ni en el interior de la masa de suelo de tamaño suficiente como para ser detectadas por el Georadar. El Georadar solo ha detectado la presencia de los tensiómetros en la disposición elegida.

En la Figura 3.1a se observa la placa y el equipo utilizado para la auscultación. La placa es necesaria debido a la poca consistencia de la muestra, sobre todo los primeros días de ensayo y luego de la inundación.

En las Figura 3.49 a Figura 3.52 se presentan los resultados de las auscultaciones con Georadar los días 3, 9, 14 y 20 del ensayo de desecación. No se han detectado grietas de considerable espesor en la masa de suelo durante el proceso de desecación.

3.5. Conclusiones respecto de los Ensayos de Laboratorio

Se ha presentado en este capítulo una técnica compatible con el desarrollo de ensayos de desecación y que permite la *auscultación tridimensional de la muestra de suelo*, el Georadar. Se estudian las grietas en tiempo real, pudiendo detectar las que son invisibles en la superficie de la muestra durante el proceso de agrietamiento en secado y/o humedecimiento (*o incluso inundación*). El GPR es una técnica capaz de detectar grietas de unos pocos milímetros de grosor (*a partir de 1-2 mm*). También es capaz de determinar la separación entre grietas cuando la distancia entre éstas es de más de 5 cm. Permite determinar si se forman grietas en la superficie inferior de la muestra (*o en el medio de la masa de suelo*) durante el proceso de secado o eventualmente confirmar que no hay grietas de más de 1-2 mm durante el proceso, como ocurrió en el ensayo de ciclos. La técnica con Georadar es prometedora y económica y por tanto debe ser tenida en cuenta.

Los *ensayos en muestras rectangulares* delgadas (35.1 cm de largo x 25.4 cm de ancho x 1 cm de alto) han sido útiles para estudiar la influencia, en el patrón final de las grietas, del tamaño máximo de partículas para preparar el lodo fluido a ser desecado en ambiente de laboratorio (22°C, 56.5% de HR). Los ensayos tuvieron una duración de 5 días. Se han ensayado bandejas de igual tamaño con suelo cuyo tamaño máximo de partículas fue de 0.42 mm en un caso y 0.104 mm en el otro. La cantidad de grietas es mayor cuando el suelo es inicialmente más fino (5.88% de la superficie son grietas para un tamaño inicial de 0.42 mm y 7.94% de la superficie son grietas cuando el tamaño inicial es 0.104 mm). Esto se debe a que partículas más finas son más ávidas de agua y por lo tanto habrá más poros que se contraerán en desecación. También,

en este caso, el suelo presenta celdas de suelo mayores y más sanas (*sin grietas capilares*) al final de la desecación. El suelo más grueso presenta grietas más irregulares y con muchas fisuras capilares aunque de menor grosor. El suelo con partículas más finas presenta grietas más definidas y sin ramificaciones capilares.

Se ha realizado un análisis de la ***influencia de la relación de lados de las bandejas rectangulares***. En primer lugar, la adherencia entre suelo y bandeja determina la configuración de las grietas de contacto entre estos dos materiales. La madera, que se ha utilizado para subdividir las bandejas, presenta una adherencia notoriamente menor que los bordes de la bandeja de PVC. Cuando existe gran adherencia como en el caso del PVC, los bordes presentan al final del ensayo celdas de pequeño tamaño que quedan adheridas al borde de la bandeja. En segundo lugar, la relación de lados determina la configuración de las grietas en el sentido de que se dispondrán en una red de grietas paralelas entre sí y perpendiculares al lado de mayor longitud cuando la relación de lados es mayor o igual a 1:10. Para relaciones de lados menores se producen grietas primarias, secundarias, terciarias, etc. que definen una serie de celdas de tamaño más o menos uniforme.

El ***ensayo de secado rápido*** en muestra cilíndrica (*40 cm de diámetro x 10 cm de altura*) ha demostrado que la temperatura tiene un efecto importante en el proceso. En este ensayo se ha conseguido producir una grieta central, que se propaga a lo largo de todo el diámetro de la muestra, y que no se ha producido en ensayos anteriores del mismo tamaño. Si bien es cierto que el control de temperatura complica los ensayos, es evidente que existe la necesidad de su implementación.

Se ha realizado un ***ensayo de ciclos*** en muestra cilíndrica (*80 cm de diámetro x 10 cm de altura*) que persiguió el objetivo de asegurar que los tensiómetros son capaces de medir los cambios de la succión en el suelo debido a los cambios de humedad de la cámara. Se ha comprobado que los tensiómetros son sensibles al aumento de humedad en la CA y a la inundación. También se ha comprobado que los tensiómetros siguen midiendo succión, en un segundo semi-ciclo de secado, luego de un ciclo de secado-humedecimiento e incluso luego de un ciclo de secado-humedecimiento e inundación.

De todo el programa experimental, se ha podido comprobar que el agrietamiento de suelos sometidos a desecación es un fenómeno tridimensional. En las muestras rectangulares de pequeño espesor (*1-2 cm*), las grietas se propagan generalmente desde los contornos hacia el centro de la muestra. Pero también hay grietas que se inician en el centro y se propagan hacia los bordes. La dirección de propagación es principalmente horizontal debido a la pequeña dimensión en altura

de las muestras. En las muestras cilíndricas ($80/40$ cm de diámetro \times $20/10$ cm de altura), las grietas se propagan desde cualquier punto y hacia prácticamente cualquier dirección. Comienzan generalmente en los bordes en el contacto con la bandeja y propagan vertical y horizontalmente al mismo tiempo siguiendo el borde demarcado por la bandeja contenedora. También se producen desde el borde o desde el centro y se propagan en dirección horizontal hasta intersectar otras grietas o los bordes de la bandeja. Muchas veces, las primeras grietas se forman en el borde en contacto con la bandeja y propagan hacia abajo, lo cual permite el análisis en dos dimensiones como se verá en el Capítulo 5 Simulaciones Numéricas.

"Hay hombres que de su cencia tienen la cabeza llena; hay sabios de todas menas, más digo sin ser muy ducho: es mejor que aprender mucho el aprender cosas buenas".

Los consejos de Martín Fierro. José Hernández (1834-1886).

Capítulo 4

Modelo Numérico

En este capítulo se presenta la formulación teórica del modelo hidromecánico adoptado para resolver el problema de desecación, retracción y agrietamiento del suelo. El capítulo se divide en cuatro apartados que abarcan respectivamente la formulación matemática del problema de flujo en medio poroso deformable, la aproximación por el Método de los Elementos Finitos (MEF), la técnica utilizada para estudiar la formación y propagación de las grietas en el suelo y una propuesta para el uso de la MFLE para el tratamiento de las grietas por desecación en suelos.

El problema acoplado, de flujo en medio poroso deformable, ha sido formulado utilizando los conceptos de Superficie de Estado (Matyas & Radhakrishna, 1968) para las Ecuaciones Constitutivas Mecánicas y los conceptos de Flujo en Medio Poroso no Saturado, mediante la Ecuación de Darcy. Se plantea la solución del sistema de ecuaciones en derivadas parciales, emergente del equilibrio de la matriz de suelo y el balance de agua, mediante el MEF y el Método de las Diferencias Finitas (MDF).

La elección de utilizar el concepto de Superficies de Estado se sustenta en el hecho de que se analiza solo un semi-ciclo de secado y las deformaciones tienen una fuerte componente volumétrica. En futuros desarrollos se puede implementar un modelo elasto-plástico para suelos no saturados como el desarrollado en el modelo de Barcelona (Alonso, et al., 1990), sobre todo si se pretende estudiar numéricamente ciclos completos de humedecimiento y secado.

La propagación de grietas en sólidos ha sido estudiada por la Mecánica de Fractura (MF), y se han establecido criterios que permiten predecir el avance de fisuras en materiales como metales, hormigón y rocas. La aplicación de la MF a suelos es relativamente reciente y hay pocos resultados experimentales. En el caso de suelos en condiciones de succión, los resultados experimentales son todavía más escasos (Ávila, 2004). Como las propiedades de la MF son sensibles a la succión, el uso de la MF en el contexto de la desecación de suelos se hace relativamente difícil. Aunque se ha estudiado su implementación en este tipo de problemas, se ha visto que era mucho más práctico aplicar un criterio de resistencia a tracción de la Resistencia de Materiales Clásica: teoría de rotura de Griffith (1924).

El modelo presentado permite el estudio de la generación de las fisuras y también su propagación. Este tipo de análisis es sin duda novedoso, porque hasta la fecha no existen programas de cálculo que aborden todo el problema: por un lado se dispone de códigos de elementos finitos que a partir de las ecuaciones básicas de Mecánica de los Medios Continuos (MMC) y de la Mecánica del Suelo (equilibrio y balance de agua), permiten plantear el problema hidromecánico en condiciones no saturadas de la desecación de un suelo. Por otro lado, hay códigos que usan la MF para predecir la propagación de una grieta en materiales cuasi-frágiles (tipo hormigón, rocas, etc.). Sin embargo, la combinación de técnicas diversas que permitan predecir el inicio de la fisura y su posterior propagación es un desarrollo totalmente nuevo.

El código propuesto en esta Tesis Doctoral se ha implementado en el entorno MATLAB⁵. Ha sido concebido e implementado exclusivamente para el análisis del problema de desecación en suelos arcillosos y ha permitido simular el proceso en una gran gama de variantes respecto de las condiciones de contorno del problema.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos con el modelo implementado en MATLAB que incluyen casos teóricos y simulaciones de ensayos de laboratorio.

⁵ MATLAB: (abreviatura de MATrix LABoratory) es una herramienta de software matemático.
<http://uk.mathworks.com/products/matlab/>

4.1. Introducción

Desde el punto de vista numérico, el problema de desecación de suelos es un problema hidromecánico (flujo y deformación) en un continuo multifase que presenta no linealidad material y a veces geométrica (cuando las deformaciones son grandes). El problema del agrietamiento, puede estudiarse mediante criterios clásicos de Resistencia de Materiales (Griffith, 1924) o mediante la MF (Lachenbruch, 1961; Lee & K.W. Lo, 1988; Konrad & Ayad, 1997; Rodríguez, et al., 2007, entre otros).

La no linealidad material del modelo propuesto se debe a la necesidad de utilizar una ley constitutiva elástica no lineal para capturar el comportamiento del suelo en desecación. El proceso de agrietamiento es además un problema no lineal (cambio de condiciones de contorno).

En esta tesis doctoral se considera que el marco de trabajo a lo largo de todo el proceso cae en el dominio de la Mecánica de Suelos no Saturados. A pesar de que se parte del suelo saturado y que al principio este permanece en esta condición, se puede aplicar dicho criterio considerando que en los primeros momentos el agua de los poros está sometida a tracciones mientras esta ocupa todo el espacio entre partículas.

El problema hidromecánico, que es el corazón del modelo, puede resolverse mediante esquemas desacoplados, acoplados o bien mediante el procedimiento escalonado. Se ha optado por el uso de esquemas explícitos, aunque esquemas iterativos son necesarios para resolver la no linealidad material y geométrica en algunos casos. En dichos casos se ha utilizado por simplicidad el esquema de Picard.

4.1.1. Hipótesis del Modelo

Las hipótesis adoptadas para la formulación del presente problema son:

1. Se consideran fenómenos isotermos, es decir, las tres fases están a igual temperatura y dicha temperatura es constante a lo largo del tiempo.
2. Se asume que las deformaciones son pequeñas.
3. Se considera que las deformaciones son lentas, por lo que podemos despreciar las aceleraciones (modelo cuasi-estático).

4. Se considera el medio poroso parcialmente saturado, en los poros hay dos fases: una líquida (agua) y otra gaseosa (aire seco y vapor de agua).
5. Se supone que no hay resistencia al flujo de aire y vapor de agua en los poros por lo que la presión de la fase gaseosa permanece igual a la presión atmosférica (se adopta $P_{\text{atm}} = 0$).
6. No se considera los fenómenos de cambio de fases del agua y del aire.
7. Las variables de estado son: los desplazamientos de la matriz sólida \mathbf{u} ; la presión de poro de agua u_w .
8. Se usa el método de los elementos finitos para la discretización espacial y el método de diferencias finitas para la discretización temporal.

4.1.2. Variables de Estado⁶

El comportamiento constitutivo de los suelos no saturados ha sido estudiado, principalmente a través de la experimentación durante décadas. Inicialmente, (Bishop, 1959) sugirió la existencia de una “tensión efectiva” comparable con la tensión efectiva de Terzaghi para suelos saturados, definida como:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + \chi(u_a - u_w) \delta_{ij} \quad \text{ó} \quad \boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1} + \chi(u_a - u_w) \mathbf{1}^7 \quad (4.1)$$

Donde $\boldsymbol{\sigma}$ es la tensión total. u_a y u_w la presión de aire y agua respectivamente y χ es un parámetro que depende fuertemente del grado de saturación, la historia de tensiones y de la estructura del suelo.

El concepto de tensión efectiva fue luego cuestionado por (Jennings & Burland, 1962); (Bishop & Blight, 1963); (Aitchison, 1965); (Blight, 1965) y (Burland, 1965).

(Bishop & Blight, 1963), (Blight, 1965) y (Burland, 1965) sugirieron la conveniencia de utilizar como variables la tensión neta: $(\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1})$ y la succión: $(u_a - u_w)$.

⁶ En este capítulo, a partir de aquí, se presentan todas las ecuaciones en notación de Einstein (o de índices) y en notación compacta. A veces, se agrega alguna aclaración en notación matricial, esto debido a que una y otra tienen ventajas y limitaciones a la hora de interpretarlas.

⁷ Los subíndices de u_a y u_w , no son índices en la notación indicial, son parte de la denominación de la presión de poro de aire y agua respectivamente y son magnitudes escalares.

Mediante el “null test” (Fredlund & Morgenstern, 1977) mostraron que el mencionado par de tensiones son de hecho un sistema que representa bien el comportamiento de los suelos parcialmente saturados. Así⁸:

$$\sigma_{ij}^{neta} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} \quad \text{ó} \quad \boldsymbol{\sigma}^{neta} = \boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1} \quad (4.2)$$

$$s = u_a - u_w \quad (4.3)$$

Donde: $\mathbf{1} \equiv \delta_{ij}$, es el delta de Kronecker.

Las deformaciones infinitesimales se definen mediante:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{ó} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \nabla^s \mathbf{u} = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \otimes \nabla + \nabla \otimes \mathbf{u}) \equiv \mathbf{L} \mathbf{u} \quad (4.4)$$

El operador ∇^s , se denomina gradiente simétrico y se define tal como muestra la expresión de la deformación infinitesimal, es decir: $\nabla^s \mathbf{u} = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \otimes \nabla + \nabla \otimes \mathbf{u})$, donde \mathbf{u} , puede ser una magnitud escalar, vectorial o tensorial. $\mathbf{L} \mathbf{u}$ es el gradiente simétrico expresado en notación matricial. En el apartado Notación se detalla la forma del operador matricial \mathbf{L} .

4.1.3. Ecuaciones de Gobierno

La ecuación de balance de momento lineal (o equilibrio), la cual es elíptica, se escribe en términos de tensiones totales (incluye a la matriz sólida del suelo y al agua):

$$(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})_{,j} + u_{a,i} + \rho g_i = 0 \quad \text{ó} \quad \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1}) + \nabla u_a + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}^9 \quad (4.5)$$

⁸ Para este problema, las tensiones $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, t)$, las deformaciones $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, t)$ y los desplazamientos $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ son función de la posición y del tiempo (variables independientes). También son función de la posición y del tiempo, la presión de poros de agua $u_w(\mathbf{x}, t)$, la presión de poro de aire $u_a(\mathbf{x}, t)$, el grado de saturación $S_r(\mathbf{x}, t)$ y por supuesto la succión $s(\mathbf{x}, t)$. Por simplificar la escritura de las ecuaciones muchas veces no se aclara esta cuestión.

⁹ Observar las siguientes equivalencias: $\nabla \cdot (\mathbf{u}) = \text{div}(\mathbf{u})$ y $\nabla(\mathbf{u}) = \text{grad}(\mathbf{u})$, son la divergencia y el gradiente de \mathbf{u} que en general puede ser una magnitud escalar, vectorial o tensorial.

Donde $\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1})$, indica divergencia del tensor de tensiones netas en notación compacta, con $\nabla \equiv \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]^T$ operador gradiente que aplicado a través del producto escalar se transforma en divergencia. En notación matricial se escribe: $\nabla \cdot (\mathbf{u}) = \nabla^T \mathbf{u}$ y $\nabla(\mathbf{u}) = \nabla \mathbf{u}^T$, siendo ∇ y \mathbf{u} vectores columna.

Donde $\sigma(x, t)$ es el tensor de tensiones totales, $(\sigma - u_a \mathbf{1})$ es el tensor de tensiones netas, definido en el apartado variable de estado, u_a es la presión de poro de aire, ρ es la densidad del medio multifase y \mathbf{g} es el vector de aceleración de la gravedad.

Además la densidad del medio multifase se calcula mediante la expresión:

$$\rho = (1 - n)\rho^s + nS_r\rho^w \quad (4.6)$$

Donde $n = V_p/V_T$, es la porosidad, V_p es el volumen de las partículas sólidas, V_T es el volumen total del sistema; ρ^s es la densidad de las partículas de suelo y ρ^w , es la densidad del agua y S_r es el grado de saturación del agua.

La ecuación (4.5) tiene como incógnita al vector de desplazamientos de la matriz de suelo. Por lo tanto, resuelve el problema de la deformación volumétrica y de las tensiones netas y la succión como se verá en el apartado de ecuación constitutiva mecánica.

La ecuación de balance de masa de agua, ecuación en derivadas parciales parabólica, es:

$$(\rho^w q_i)_{,i} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho^w n S_r) = 0 \quad \text{ó} \quad \nabla \cdot (\rho^w \mathbf{q}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho^w n S_r) = 0 \quad (4.7)$$

Donde ρ^w es la densidad del agua, q_i es el vector de velocidad de Darcy y n es la porosidad del suelo.

Se considera que el agua es incompresible, esto implica densidad del agua constante por lo que podemos reescribir la ecuación anterior:

$$q_{i,i} + \frac{\partial}{\partial t}(n S_r) = 0 \quad \text{ó} \quad \nabla \cdot (\mathbf{q}) + \frac{\partial}{\partial t}(n S_r) = 0 \quad (4.8)$$

Considerando que la presión de poro de aire u_a es constante e igual a cero, la ecuación de Darcy para medio poroso no saturado, puede expresarse de la siguiente manera en función de la presión de poro negativa de agua u_w :

$$\begin{aligned} q_i &= -K_{ij}^P(S_r)(u_{w,j} - \rho^w g_j) = -K_{ij}^P(S_r)u_{w,j} + K_{ij}^P(S_r)\rho^w g_j \\ \mathbf{q} &= -\mathbf{K}^P(S_r) \cdot (\nabla u_w - \rho^w \mathbf{g}) = -\mathbf{K}^P(S_r) \cdot \nabla u_w + \mathbf{K}^P(S_r) \cdot \rho^w \mathbf{g} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Donde \mathbf{K}^P es el tensor permeabilidad del suelo y u_w es la presión de poro negativa de agua.

La ecuación de continuidad más la ecuación de Darcy, se pueden expresar en una ecuación:

$$\begin{aligned} & \left[-K_{ij}^P(S_r)u_{w,j} \right]_i + \left[K_{ij}^P(S_r)\rho^w g_j \right]_i + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot [-\mathbf{K}^P(S_r) \cdot \nabla u_w] + \nabla \cdot [-\rho^w \mathbf{K}^P(S_r) \cdot \mathbf{g}] + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Se va a introducir una pequeña incongruencia aquí. Por hipótesis el agua es incompresible y por ello su densidad se considera constante, pero a la ecuación de continuidad se va a agregar un término que representa la compresibilidad del agua y que lo agregamos por sus características de dar estabilidad numérica al problema. De todas formas su valor es pequeño, ya que la rigidez volumétrica del agua K^w es muy grande. De estas consideraciones obtenemos:

$$\begin{aligned} & \left[-K_{ij}^P(S_r)u_{w,j} \right]_i + \left[K_{ij}^P(S_r)\rho^w g_j \right]_i + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{nS_r}{K^w} \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot [-\mathbf{K}^P(S_r) \cdot \nabla u_w] + \nabla \cdot [-\rho^w \mathbf{K}^P(S_r) \cdot \mathbf{g}] + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{nS_r}{K^w} \frac{\partial u_w}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Habrà que tener en cuenta más adelante que $\Delta n = \varepsilon_v$ (el incremento de la porosidad es igual a la deformación volumétrica).

Teniendo en cuenta que el factor $\frac{\partial S_r}{\partial t} = \frac{\partial S_r}{\partial \sigma^{neta}} \frac{\partial \sigma^{neta}}{\partial t} + \frac{\partial S_r}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t}$, resulta:

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot [-\mathbf{K}^P(S_r) \cdot \nabla u_w] + \nabla \cdot [-\rho^w \mathbf{K}^P(S_r) \cdot \mathbf{g}] + \\ & + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial \sigma^{neta}} \frac{\partial \sigma^{neta}}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} + \frac{nS_r}{K^w} \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

En el caso particular de la desecación, el grado de saturación solo depende de la presión negativa de poros (succión) y no de la tensión (Curva de Retención), así:

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} = \frac{\partial S_r}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t}$$

Con lo cual queda:

$$\nabla \cdot [-\mathbf{K}^P(S_r) \cdot \nabla u_w] + \nabla \cdot [-\rho^w \mathbf{K}^P(S_r) \cdot \mathbf{g}] + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} + \frac{nS_r}{K^w} \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \quad (4.13)$$

Como el grado de saturación es función de la presión negativa de poros (succión), se puede escribir la ecuación anterior de manera que se puedan ver claramente los términos no lineales:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [-\mathbf{K}^P(u_w) \cdot \nabla u_w] + \nabla \cdot [-\rho^w \mathbf{K}^P(u_w) \cdot \mathbf{g}] + S_r(u_w) \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r(u_w)}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} \\ + \frac{n S_r(u_w)}{K^w} \frac{\partial u_w}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

En esta expresión se observa que las incógnitas del problema hidráulico son la presión negativa de poros de agua, u_w para cada punto del espacio (∇u_w) y para cada instante de tiempo ($\frac{\partial u_w}{\partial t}$); además, la deformación volumétrica del medio $\Delta n = \varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$, en cada instante de tiempo ($\frac{\partial n}{\partial t}$). Por otro lado, queda en evidencia la no linealidad del problema debido a que la permeabilidad de la matriz de suelo, \mathbf{K}^P , que es una magnitud tensorial de segundo orden, y el grado de saturación S_r que es un escalar, son funciones de la presión negativa de poros de agua (succión), u_w .

4.1.3.1. Condiciones Iniciales del Problema Hidromecánico.

Deben ser conocidos los campos de desplazamientos y presiones de agua para el instante de referencia $t_0 = 0$. Condición de contorno conocida como de Dirichlet.

$$u_i = u_i^0 \quad \text{ó} \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \quad \text{en } \Omega \text{ y } \Gamma \quad (4.15)$$

$$u_w = p_0 \quad \text{en } \Omega \text{ y } \Gamma \quad (4.16)$$

Donde Ω , es el dominio y Γ , es el contorno

u_i ó \mathbf{u} es el campo de desplazamientos de la matriz sólida y u_i^0 ó \mathbf{u}^0 es el campo de desplazamientos en el tiempo inicial $t_0 = 0$; p_0 es la presión de poros inicial en el dominio de estudio.

4.1.3.2. Condiciones de Contorno del Problema Hidromecánico

Las condiciones de contorno son los valores prescritos de los desplazamientos en el contorno del dominio y la presión de poro de agua impuesta en ciertos puntos del mismo contorno. Hay que asegurar aquí el mínimo de restricciones necesarias para poder resolver el problema (restricción de los desplazamientos en x, y, z para un problema tridimensional o bien en x e y para un problema bidimensional). Además, como mínimo hay que restringir el valor de la presión de poros de agua en un punto. Esta también es una condición de contorno de Dirichlet.

$$u_i = \hat{u}_i \quad \text{ó} \quad \mathbf{u} = \hat{\mathbf{u}} \quad \text{en } \Gamma \quad (4.17)$$

$$u_w = \hat{p} \quad \text{en } \Gamma \quad (4.18)$$

4.1.3.3. Condiciones de Contorno de Tensión del Problema Hidromecánico

Esto corresponde a la tensión neta aplicada en los contornos del dominio y forma parte de la componente mecánica del problema acoplado.¹⁰ Estas se conocen como condiciones de contorno de Neumann.

$$(\sigma_{ij} - u_a)n_j = (\sigma_{ji} - u_a)n_j = T_i \quad \text{ó} \quad (\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1}) \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad \text{en } \Gamma \quad (4.19)$$

$$\mathbf{I}^T (\boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{m}) - \bar{\mathbf{t}} = \mathbf{0} \quad \text{en } \Gamma \quad (4.20)$$

4.1.3.4. Condiciones de Contorno de Flujo del Problema Hidromecánico

Esto es el flujo de agua impuesto en parte del contorno. Condición de contorno de Neumann.

$$K_{ij}^P(S_r)(-u_{w,j} + \rho^w g_j)n_i = q^w \quad \text{ó} \quad \mathbf{K}^P(S_r)(-\nabla u_w + \rho^w \mathbf{g}) \cdot \mathbf{n} = q^w \quad \text{en } \Gamma \quad (4.21)$$

Donde q^w , es el flujo impuesto de masa de agua normal al contorno.

4.1.4. Modelo Constitutivo Mecánico

Una de las dificultades de la simulación en suelos radica en que la relación tensión-deformación es extremadamente compleja. Para obtener modelos constitutivos prácticos, es necesario recurrir a simplificaciones.

Se propone utilizar aquí un modelo constitutivo elástico no lineal. Los modelos elásticos basados en la mecánica de los medios continuos se clasifican generalmente en:

Elasticidad Lineal (Ley de Hooke generalizada)

Elasticidad de Cauchy

¹⁰ $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$ es un vector normal a la superficie donde se aplica la tensión neta. $\mathbf{m} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \equiv \mathbf{1} \equiv \delta_{ij}$ es el delta de Kronecker en notación matricial, compacta e indicial respectivamente. Finalmente, \mathbf{I} es una matriz que opera con el vector normal en notación matricial, ver detalles en apéndice 1.

Híper elasticidad (o Elasticidad de Green)

Hipo-elasticidad

El modelo que se propone es elástico no lineal de Cauchy basado en el concepto de superficies de estado. Matemáticamente la relación se puede expresar:

$$\sigma_{ij} = F_{ij}(\varepsilon_{kl}) \quad \text{ó} \quad \varepsilon_{ij} = F_{ij}(\sigma_{kl}) \quad (4.22)$$

Algunas características particulares de este modelo constitutivo son:

El modelo elástico no lineal de Cauchy es conceptual y matemáticamente simple. Los parámetros necesarios para el modelo son relativamente simples de obtener.

Este modelo no es capaz de reproducir el fenómeno de dilatancia (cambios de volumen debidos a esfuerzos tangenciales).

Las tensiones calculadas con este modelo son independientes de la historia de deformaciones. El modelo exhibe disipación de energía debido a que el trabajo depende de la historia de deformaciones del cuerpo. Como consecuencia las constantes elásticas no pueden ser derivadas de una función potencial.

Las superficies de estado (Matyas & Radhakrishna, 1968); (Lloret & Alonso, 1985) son superficies que se obtienen experimentalmente (ver Figura 4.1) y que resultan de interpolar varios puntos en un espacio $p' - s - e$ (Tensión media neta – Succión – Relación de Vacíos) y para nuestro caso en forma incremental es:

$$\Delta e = a_1 \Delta \ln(p' + a_4) + a_2 \Delta \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) + a_3 \Delta \left[\ln(p' + a_4) \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) \right] \quad (4.23)$$

Dónde:

$\Delta e = e_f - e_0$: Es el incrementos de la relación de vacíos [(-) si disminuye el volumen; (+) si el volumen aumenta].

$p' = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$: Es la tensión media neta [compresiones (+)]

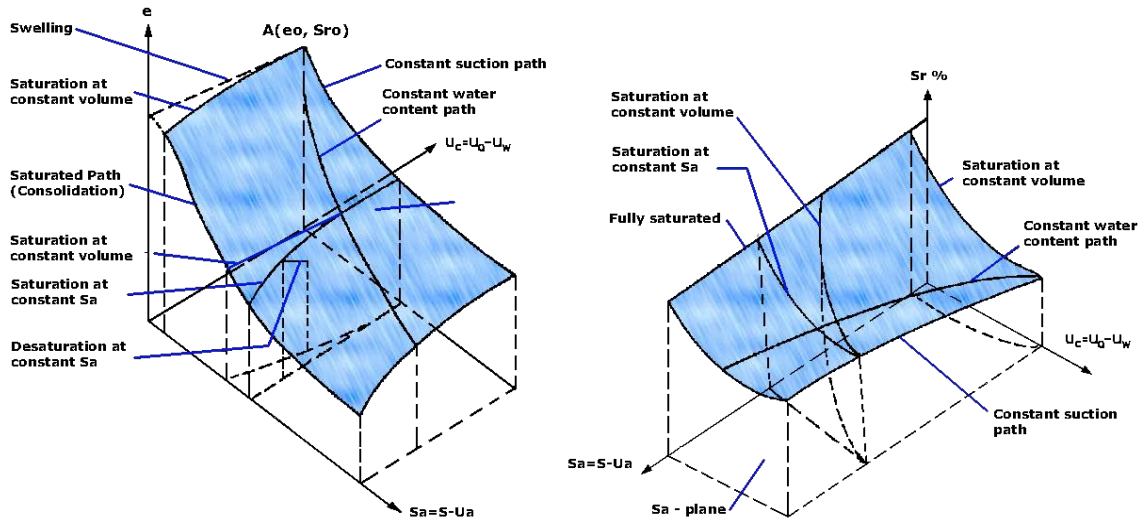


Figura 4.1 - Superficies de Estado, de (Matyas & Radhakrishna, 1968)

s : Succión (+)

a_1, a_2, a_3 y a_4 : Parámetros constantes de la superficie de estado

p_{ref} : es una presión de referencia

Los incrementos de la (4.23) representan exactamente según las propiedades de los logaritmos:

$$\Delta \ln(p' + a_4) = \ln(p'_f + a_4) - \ln(p'_0 + a_4) = \ln \left[\frac{(p'_f + a_4)}{(p'_0 + a_4)} \right] \quad (4.24)$$

$$\Delta \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) = \ln \left(\frac{s_f + p_{ref}}{p_{ref}} \right) - \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) = \ln \frac{\frac{s_f + p_{ref}}{p_{ref}}}{\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}}} = \ln \frac{s_f + p_{ref}}{s_0 + p_{ref}} \quad (4.25)$$

$$\Delta \left[\ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] = \ln(p'_f + a_4) \ln \left(\frac{s_f + p_{ref}}{p_{ref}} \right) - \ln(p'_0 + a_4) \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \quad (4.26)$$

Esta expresión dice que a incrementos de tensiones medias netas y/o succiones, corresponden incrementos en la relación de vacíos.

La deformación volumétrica del suelo se escribe:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (4.27)$$

Donde Δe es un incremento de la relación de vacíos y e_0 es la relación de vacíos inicial. El signo negativo obedece a que si disminuye la relación de vacíos, disminuye el volumen y como se trata de compresión nos queda un valor positivo de deformación volumétrica en compresión según la convención de signos adoptada.

De forma más general esta relación tiene la siguiente forma:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} d\varepsilon_{kl} \quad (4.28)$$

Donde D_{ijkl} , es un tensor de 4º orden tangente y se puede representar mediante una matriz de coeficientes variables cuyas expresiones en función de la succión o el grado de saturación y de la tensión neta se obtienen calculando las pendientes de superficie de estado.

El hecho de que el comportamiento constitutivo del suelo sea muy complejo hace que las relaciones propuestas tengan un rango de aplicación muy acotado. Este caso no es la excepción, así el modelo constitutivo que se plantea, está pensado para procesos de desecación, donde se producen deformaciones principalmente volumétricas y por lo tanto las deformaciones de corte no tienen mucha relevancia.

4.1.4.1. Variables de Estado de Tensiones, Deformaciones y Módulos Elásticos no Lineales del Modelo Constitutivo Mecánico

Para modelar el comportamiento de materiales que tienen varias fases como es el caso de los suelos, se asume que existen varios medios continuos que conviven en un mismo espacio (volumen de control). Así, en el caso del suelo no saturado que consta de tres fases, fase sólida (granos de suelo), fase líquida (agua) y fase gaseosa (vapor de agua + aire seco), se tienen tres medios continuos en el mismo volumen de control.

Se definen las dos variables de estado de tensiones: la tensión neta (tensión total en exceso de la presión de aire) y la succión (presión de aire menos presión de agua) definidas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Tensión neta:} \quad \sigma_{ij}^{neta} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} & \Rightarrow d\sigma_{ij}^{neta} = d\sigma_{ij} - du_a \delta_{ij} \\ \text{ó } \boldsymbol{\sigma}^{neta} = \boldsymbol{\sigma} - u_a \mathbf{1} & \text{ó } d\boldsymbol{\sigma}^{neta} = d\boldsymbol{\sigma} - du_a \mathbf{1} \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\text{Succión:} \quad s = u_a - u_w \quad \Rightarrow \quad ds = du_a - du_w \quad (4.30)$$

En las ecuaciones (4.29) y (4.30) se incluyen las definiciones de tensión neta tanto total como diferencial. Donde u_a es la presión del aire, u_w es la presión de poro de agua, σ_{ij} ó $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones totales y du_a , du_w y $d\sigma_{ij}$ sus respectivos incrementos diferenciales y δ_{ij} ó $\mathbf{1}$ es el delta de Kronecker.

Si se aplica una deformación a una porción de suelo no saturado, el incremento de deformación total será igual a la suma de los incrementos de deformaciones producidos por las tensiones netas y la succión (hipótesis aditiva), así:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{ij} &= d\varepsilon_{ij}^{neta} + d\varepsilon_{ij}^s = C_{ijkl}(K, G)d\sigma_{kl}^{neta} + h_{ij}(K^s)ds \\ \text{ó } d\boldsymbol{\varepsilon} &= d\boldsymbol{\varepsilon}^{neta} + d\boldsymbol{\varepsilon}^s = \mathbf{C}(K, G)d\boldsymbol{\sigma}^{neta} + \mathbf{h}(K^s)ds \end{aligned} \quad (4.31)$$

Dónde: C_{ijkl} o \mathbf{C} , es el tensor de flexibilidad (Compliance) de cuarto orden y tangente por tratarse de una relación no lineal. h_{ij} ó \mathbf{h} , es un tensor de segundo orden que tiene por componentes al módulo de deformación volumétrica relacionado con la succión.

También es posible escribir los incrementos de tensión neta en función de los incrementos de deformación total y de los incrementos de succión:

$$\begin{aligned} d\sigma_{kl}^{neta} &= [C_{ijkl}(K, G)]^{-1}(d\varepsilon_{ij} - h_{ij}ds) = D_{ijkl}(K, G)(d\varepsilon_{ij} - h_{ij}ds) \\ \text{ó } d\boldsymbol{\sigma}^{neta} &= [\mathbf{C}(K, G)]^{-1}(d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{h}(K^s)ds) = \mathbf{D}(d\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{h}(K^s)ds) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Dónde: D_{ijkl} ó \mathbf{D} , es el tensor de rigidez (Stiffness) tangente y es la inversa de C_{ijkl} o \mathbf{C} . Más adelante se dan detalles de estos tensores.

En las ecuaciones (4.31) y (4.32) se observa que la flexibilidad y la rigidez son funciones de los módulos volumétrico K y de corte G , y que el tensor relacionado con la succión es función del módulo volumétrico de succión K^s . Para el caso elástico lineal K , G y K^s , serán constantes del material y formarán parte del tensor de rigidez y/o flexibilidad de la relación tensión-deformación y será por supuesto constante. Para el caso no lineal, se tiene que obtener expresiones de esos coeficientes en función de la tensión neta y de la succión. Para ello se

utiliza el concepto de “Superficies de Estado” que está basado en ensayos de laboratorio para condiciones típicamente edométricas cuya expresión más exacta viene dada por:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left\{ a_1 \Delta \ln(p' + a_4) + a_2 \Delta \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) + a_3 \Delta \left[\ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] \right\} \quad (4.33)$$

Donde los factores son los mismos que en la ecuación (4.23).

De $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{neta} + \varepsilon_{ij}^s \Rightarrow d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{neta} + d\varepsilon_{ij}^s$, contrayendo índices podemos llegar a que: $d\varepsilon_{ii} = d\varepsilon_{ii}^{neta} + d\varepsilon_{ii}^s$, es decir, $d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^{neta} + d\varepsilon_v^s$ la deformación volumétrica total es igual a la deformación volumétrica producida por la tensión neta más la deformación volumétrica producida por la succión. Ahora bien, derivando esta última expresión respecto de la tensión neta primero y luego de la succión se pueden obtener expresiones de los módulos elásticos volumétricos tangentes, así, partiendo de que las deformaciones volumétricas debidas a tensiones netas y a succión son respectivamente:

$$d\varepsilon_v^{neta} = K_t(p', s) dp' \quad y \quad d\varepsilon_v^s = \frac{ds}{K_t^s(p', s)} \quad (4.34)$$

En la ecuación (4.34) se agrega un subíndice t a K y K^s para denotar el carácter tangente debido a la no linealidad. El incremento de deformación volumétrica total será:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_v^{neta} + d\varepsilon_v^s = K_t(p', s) dp' + \frac{ds}{K_t^s(p', s)} \quad (4.35)$$

Diferenciando la expresión de la deformación volumétrica ε_v expresada como superficie de estado, ecuación (4.33) e igualando con la ecuación (4.35):

$$d\varepsilon_v = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p'} dp' + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial s} ds = K_t(p', s) dp' + \frac{1}{K_t^s(p', s)} ds \quad (4.36)$$

De donde comparando, se puede ver que:

$$K_t(p', s) = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p'} \quad y \quad \frac{1}{K_t^s(p', s)} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial s} \quad (4.37)$$

Primero se escribe la ecuación de la deformación volumétrica aplicando un incremento desde valores iniciales a un valor final genérico de succión y tensión media neta:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left\{ \begin{aligned} & a_1 \left[\ln(p' + a_4) - \ln(p'_0 + a_4) \right] + a_2 \left[\ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) - \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] + \\ & + a_3 \left[\ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) - \ln(p'_0 + a_4) \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

Aplicando las propiedades de los logaritmos:

$$\varepsilon_v = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left\{ \begin{aligned} & -a_1 \ln(p'_0 + a_4) - a_2 \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) - a_3 \ln(p'_0 + a_4) \ln \left(\frac{s_0 + p_{ref}}{p_{ref}} \right) + \\ & + a_1 \ln(p' + a_4) + a_2 \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) + a_3 \ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

Derivando respecto de la tensión media neta p' :

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p'} = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left[\frac{a_1}{p' + a_4} + \frac{a_3}{p' + a_4} \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] \quad (4.40)$$

Derivando respecto de la succión s :

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial s} = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left[\frac{a_2}{s + p_{ref}} + \frac{a_3}{s + p_{ref}} \ln(p' + a_4) \right] \quad (4.41)$$

Y finalmente, simplificando:

$$\frac{1}{K_t(p', s)} = \frac{(1+e_0)(p' + a_4)}{-a_1 - a_3 \ln \frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}} \quad (4.42)$$

$$K_t^s(p', s) = \frac{(1+e_0)(s + p_{ref})}{-a_2 - a_3 \ln(p' + a_4)} \quad (4.43)$$

Para el caso en que se suponga que la presión del aire será siempre igual a la presión atmosférica y considerando que es igual a cero ($u_a = 0$), las variables de estado de tensión quedan:

$$\text{Tensión neta:} \quad \sigma_{ij}^{neta} = \sigma_{ij} \quad \Rightarrow \quad d\sigma_{ij}^{neta} = d\sigma_{ij} \quad (4.44)$$

$$\text{Tensión media neta:} \quad \sigma_v^{neta} = p' \quad \Rightarrow \quad d\sigma_v^{neta} = dp' \quad (4.45)$$

$$\text{Succión:} \quad s = -u_w \quad \Rightarrow \quad ds = -du_w \quad (4.46)$$

De esta manera la expresión de la deformación volumétrica en función de la superficie de estado queda:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = \left(-\frac{1}{1+e_0} \right) \left\{ a_1 \ln(p' + a_4) + a_2 \ln \left(\frac{-u_w + p_{ref}}{p_{ref}} \right) + a_3 \left[\ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{-u_w + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] \right\} \quad (4.47)$$

Y los módulos derivados de esta función serán:

Módulo de deformación volumétrica:

$$\frac{1}{K_t(p', u_w)} = \frac{(1+e_0)(p'_0 + a_4)}{-a_1 - a_3 \ln \frac{-u_w + p_{ref}}{p_{ref}}} \quad (4.48)$$

Módulo de deformación debido a succión:

$$K_t^s(p', u_w) = \frac{(1+e_0)(-u_w + p_{ref})}{-a_2 - a_3 \ln(p' + a_4)} \quad (4.49)$$

Adoptando un coeficiente de Poisson constante y utilizando la relación entre módulo de corte y módulo volumétrico de la elasticidad lineal, queda definido el módulo de corte tangente de la siguiente manera:

Módulo de Corte:

$$G_t = \frac{3K_t(1-2\nu)}{2(1+\nu)} = \frac{3(1-2\nu)(1+e_0)(p'_0 + a_4)}{2(1+\nu) \left(-a_1 - a_3 \ln \frac{-u_w + p_{ref}}{p_{ref}} \right)} \quad (4.50)$$

La deformación volumétrica debida a succión (en este caso presión de poro de agua) queda:

$$d\varepsilon_v^s = \frac{-du_w}{K_t^s(p', s)} \quad (4.51)$$

Y la relación tensión deformación:

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(d\varepsilon_{kl} + \frac{du_w}{3K_t^s}\delta_{kl}) = D_{ijkl}(d\varepsilon_{kl} - \frac{d\varepsilon_v^s}{3}\delta_{kl}) \quad (4.52)$$

En definitiva de forma más general la relación tensión deformación para suelos no saturados, basada en superficies de estado queda:

$$^{11} d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^s) \quad \text{ó} \quad d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_T (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^s) = \mathbf{D}_T \left(d\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{m} \frac{du_w}{3K_t^s} \right) \quad (4.53)$$

En notación de índices y matricial respectivamente:

Siendo:

\mathbf{D}_T : Matriz de rigidez elástica tangente.

σ_{ij} ó $\boldsymbol{\sigma}$: Tensor de tensiones totales o netas, para el caso es igual por ser $u_a = p_{atm} = 0$ y $d\sigma_{ij}$ ó $d\boldsymbol{\sigma}$, su diferencial.

ε_{kl} ó $\boldsymbol{\varepsilon}$: Tensor de deformaciones totales y $d\varepsilon_{kl}$ ó $d\boldsymbol{\varepsilon}$ su diferencial.

ε_{kl}^s ó $\boldsymbol{\varepsilon}^s$: Tensor de deformaciones debido a succión, es un tensor esférico, donde:

$$\varepsilon_{11}^s = \varepsilon_{22}^s = \varepsilon_{33}^s = \frac{\varepsilon_v^s}{3} = \frac{p}{3K_t^s}; \quad \varepsilon_{12}^s = \varepsilon_{13}^s = \varepsilon_{23}^s = 0 \quad \text{y} \quad d\varepsilon_{kl}^s \text{ ó } d\boldsymbol{\varepsilon}^s \text{ es su diferencial.}$$

$\mathbf{m} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$: es el delta de Kronecker en notación matricial.

4.1.4.2. Forma Matricial de la Relación Tensión-Deformación

La forma matricial de la relación tensión deformación elástica no lineal basada en la superficie de estado, se puede escribir:

¹¹ En esta ecuación se ha utilizado la notación matricial por considerarse más apropiado en conexión con el siguiente apartado "Forma matricial de la Relación Tensión – Deformación", ya que en dicho apartado se utiliza la notación de Voigt para los tensores de tensión y deformación. Ver apéndice 1.

$$\begin{bmatrix} d(\sigma_x - u_a) \\ d(\sigma_y - u_a) \\ d(\sigma_z - u_a) \\ d\tau_{xy} \\ d\tau_{xz} \\ d\tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_x - \frac{1}{3K^s} d(u_a - u_w) \\ d\varepsilon_y - \frac{1}{3K^s} d(u_a - u_w) \\ d\varepsilon_z - \frac{1}{3K^s} d(u_a - u_w) \\ d\gamma_{xy} \\ d\gamma_{xz} \\ d\gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Donde el primer vector columna a la izquierda de la igualdad representa al tensor diferencial de tensiones netas en la matriz de suelo. A la derecha de la igualdad se observa la matriz de rigidez que multiplica al tensor diferencial de deformaciones netas igual a la diferencia entre las deformaciones totales y las debidas a succión.

Con la hipótesis de presión de aire constante e igual a cero: $u_a = 0$, queda:

$$\begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{xy} \\ d\tau_{xz} \\ d\tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & K - \frac{2}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ K - \frac{2}{3}G & K - \frac{2}{3}G & K + \frac{4}{3}G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_x + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_y + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_z + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\gamma_{xy} \\ d\gamma_{xz} \\ d\gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Si se invierte la relación para obtener las deformaciones en función de las tensiones y de la succión:

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_x + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_y + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_z + \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\gamma_{xy} \\ d\gamma_{xz} \\ d\gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} & -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & \frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} & -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & -\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} & \frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{xy} \\ d\tau_{xz} \\ d\tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Escribiendo cada componente de las deformaciones normales por separado:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_x &= \left(\frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} \right) d\sigma_x + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_y + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_z - \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_y &= \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_x + \left(\frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} \right) d\sigma_y + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_z - \frac{1}{3K^s} du_w \\ d\varepsilon_z &= \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_x + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) d\sigma_y + \left(\frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} \right) d\sigma_z - \frac{1}{3K^s} du_w \end{aligned} \quad (4.57)$$

Si se diera el caso de tensión isotrópica: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ y teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} \right) + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) + \left(-\frac{1}{18} \frac{3K-2G}{KG} \right) = \\ &= \left(\frac{1}{9} \frac{3K+G}{KG} \right) - \left(\frac{1}{9} \frac{3K-2G}{KG} \right) = \frac{1}{9} \frac{3K}{KG} + \frac{1}{9} \frac{G}{KG} - \frac{1}{9} \frac{3K}{KG} + \frac{1}{9} \frac{2G}{KG} = \frac{1}{3K} \end{aligned} \quad (4.58)$$

En este caso la deformación volumétrica sería:

$$d\varepsilon_v = d\varepsilon_x + d\varepsilon_y + d\varepsilon_z = \frac{1}{3K} d\sigma_x + \frac{1}{3K} d\sigma_y + \frac{1}{3K} d\sigma_z - \frac{1}{K^s} du_w \quad (4.59)$$

$$d\varepsilon_v = \frac{1}{3K} (d\sigma_x + d\sigma_y + d\sigma_z) - \frac{1}{K^s} du_w \quad (4.60)$$

$$d\varepsilon_v = \frac{1}{K} dp' - \frac{1}{K^s} du_w \quad (4.61)$$

Dónde: $p' = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ es la tensión media total (o neta cuando se trabaja en términos de succión) y para el caso particular de tensión isotropa: $p' = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$.

En este caso los efectos de las tensiones totales y de la presión de poro de agua están desacoplados, así:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial p'} = \frac{1}{K} \quad y \quad \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial u_w} = \frac{1}{K^s} \quad (4.62)$$

4.1.4.3. Convención de Signos

Usualmente en Geotecnia se establece que las Compresiones (+) son positivas y que estas reducen el volumen, por ello:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_0} = -\frac{e_{final} - e_{inicial}}{1 + e_{inicial}} = -\frac{e_f - e_0}{1 + e_0} \quad (4.63)$$

Con lo cual un valor positivo de la deformación volumétrica indica una disminución del volumen de la porción de suelo estudiada.

4.1.5. Modelo Constitutivo Hidráulico. Ley de Darcy.

Esta es la ley constitutiva para los problemas hidráulicos y relaciona el flujo, la presión negativa de poros y el peso del agua, mediante el tensor de permeabilidad.

$$q_i = -K_{ij}(S_r)(p_{,j} - \rho^w g_j) \quad \text{ó} \quad \mathbf{q} = -\mathbf{K}(S_r) \cdot (\nabla p - \rho^w \mathbf{g}) \quad (4.64)$$

Dónde: ∇p es el gradiente de la presión de agua en los poros, el punto indica producto escalar o contraído; $\mathbf{K}(S_r)$ es el tensor de permeabilidades y es función del grado de saturación; \mathbf{g} es el vector aceleración de la gravedad y ρ^w es la densidad del agua.

4.1.5.1. Tensor de Permeabilidad

El tensor permeabilidad, que gobierna el flujo de líquido en el medio poroso, puede expresarse como sigue:

$$K_{ij}(S_r) = k_{ij}(n) \frac{k^{rl}(S_r)}{\mu^l} \quad \text{ó} \quad \mathbf{K}(S_r) = \mathbf{k}(n) \frac{k^{rl}(S_r)}{\mu^l} \quad (4.65)$$

Dónde: $k^{rl}[-]$, es la permeabilidad relativa del líquido, es adimensional y varía de 0 a 1. Además, k^{rl} es función del grado de saturación (adoptamos: $k^{rl} = (S_r)^r$, donde r es una constante); $\mu^l[Pa \cdot s]$, es la viscosidad dinámica de la fase líquida y es función de la temperatura. $\mathbf{k}[m^2]$, es el tensor de permeabilidad intrínseca, función de la porosidad, es decir, cambia con las deformaciones del suelo. Con la hipótesis de suelo indeformable este tensor se hace constante.

Si la permeabilidad es la misma en todas las direcciones del medio (isotropía), se puede trabajar con una permeabilidad escalar. Si se da el caso de que la permeabilidad tiene direcciones preferentes (ortotropía, axisimetría, etc.) el tensor de permeabilidad puede ser diagonal.

4.1.5.2. Curva de Retención

La relación entre la succión y el grado de saturación se conoce como la Curva de Retención. En este modelo se utiliza la ecuación de VanGenuchten (1980):

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0 f_n} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (4.66)$$

$$f_n = \exp[-\eta(n - n_0)] \quad (4.67)$$

Donde: S_r es el grado de saturación; s es la succión; λ , es un parámetro material y P_0 es el valor de entrada de aire para un valor de porosidad n_0 inicial, adoptado como un valor de referencia; n es la porosidad. f_n , es una función propuesta que tiene en cuenta la influencia de la porosidad en la curva de retención mediante el parámetro η . Si el medio fuera indeformable la función f_n tendrá un valor unidad, puesto que la porosidad será constante.

4.2. Aproximación por el Método de los Elementos Finitos

En este apartado se presenta la solución de la formulación hidromecánica presentada arriba mediante la implementación del Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de las Diferencias Finitas (MDF) (Olivella, 1995; Navarro Gámir, V. 1997; Lewis & Schrefler, 1998).

4.2.1. El Problema Mecánico

La forma integral¹² de la componente mecánica de este problema, obtenida mediante el método de los residuos ponderados, es la siguiente:

$$\int_{\Omega} \mathbf{w}^T (\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g}) d\Omega + \int_{\Gamma} \bar{\mathbf{w}}^T (\mathbf{I}^T \boldsymbol{\sigma} - \bar{\mathbf{t}}) d\Gamma = 0 \quad (4.68)$$

Dónde: \mathbf{w} y $\bar{\mathbf{w}}$ son funciones de peso; \mathbf{L} es el operador divergencia; \mathbf{I} es una matriz relacionada con el vector normal a la superficie de dirección \mathbf{t} donde se aplican las condiciones de contorno; $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de tensiones totales; ρ la densidad del medio poroso y \mathbf{g} el vector aceleración de la gravedad.

Ω y Γ son el dominio y el contorno respectivamente.

Se aplica integración por partes y el teorema de la divergencia de Green al primer término de la primera integral, y se obtiene:

$$\int_{\Omega} \mathbf{w}^T (\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma}) d\Omega = - \int_{\Omega} (\mathbf{L} \mathbf{w})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{I}^T \boldsymbol{\sigma} d\Gamma \quad (4.69)$$

Eligiendo las funciones de peso de modo que $\bar{\mathbf{w}} = -\mathbf{w}$, se obtiene:

$$- \int_{\Omega} (\mathbf{L} \mathbf{w})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{I}^T \boldsymbol{\sigma} d\Gamma + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \rho \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{I}^T \boldsymbol{\sigma} d\Gamma + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma = 0 \quad (4.70)$$

Simplificando el segundo término con el cuarto resulta:

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L} \mathbf{w})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \rho \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (4.71)$$

¹² En este capítulo se utiliza la notación matricial por ser más adecuada respecto de la implementación en un código numérico.

Si se elige como funciones de peso ciertos incrementos de desplazamientos virtuales compatibles con las condiciones de contorno del problema, $\mathbf{w} = \delta \mathbf{u}$, la última expresión queda:

$$\int_{\Omega} (\mathbf{L} \delta \mathbf{u})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \rho \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (4.72)$$

Y teniendo en cuenta que $\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \delta \mathbf{u}$, finalmente:

$$\int_{\Omega} (\delta \boldsymbol{\varepsilon})^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \rho \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \delta \mathbf{u}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (4.73)$$

Que no es más que la expresión del Principio de los Trabajos Virtuales en términos de deformaciones internas y desplazamientos de las cargas exteriores.

4.2.1.1. Funciones de Forma para el Problema Mecánico

El método de los elementos finitos discretiza el medio y transforma el problema continuo en un problema discreto apoyado en los nodos de los elementos.

Las funciones de forma se utilizan para trasladar las incógnitas a los nodos de dicho elemento, es decir, se pasa de tener como incógnita un campo, de por ejemplo, desplazamientos a tener como incógnita los desplazamientos en los nodos del elemento.

El problema se traslada a los nodos mediante las siguientes ecuaciones:

$$p \cong \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}} \quad (4.74)$$

$$\mathbf{u} \cong \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}} \quad (4.75)$$

Dónde:

p y \mathbf{u} : es el campo de presiones y desplazamientos respectivamente, en alguna porción del dominio (dentro del elemento).

\mathbf{N}_p y \mathbf{N}_u : son las funciones de forma del campo de presiones de poro de agua y de desplazamientos nodales.

$\bar{\mathbf{p}}$ y $\bar{\mathbf{u}}$: son los vectores de presión en los nodos y de desplazamientos en los nodos respectivamente.

Se adoptan como funciones de peso de la ecuación (4.71) a las funciones de forma de los desplazamientos (formulación de Galerkin):

$$\mathbf{w}^T = \mathbf{N}_u \quad (4.76)$$

$$\mathbf{B}^T = (\mathbf{L}\mathbf{w})^T = (\mathbf{L}\mathbf{N}_u)^T \quad (4.77)$$

Donde:

\mathbf{B} : es la matriz de derivadas de las funciones de forma que será utilizada posteriormente.

\mathbf{L} : es el operador gradiente en notación matricial.

La relación tensión-deformación se escribe:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^s) = \mathbf{D}\left(d\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{m}\frac{dp}{3K_t^s}\right) \quad (4.78)$$

En esta expresión ya se ha tenido en cuenta que la tensión neta es igual a la tensión total y la expresión entre paréntesis representa la deformación neta. Teniendo en cuenta que:

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}d\mathbf{u} = \mathbf{L}\mathbf{N}_u d\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{B}d\bar{\mathbf{u}} \quad (4.79)$$

La relación (4.78) puede expresarse en forma incremental como:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial t} = \mathbf{D}_T \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{D}_T \frac{1}{3K_t^s} \mathbf{m} \mathbf{N}_p \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (4.80)$$

La forma débil del problema de equilibrio habiendo reemplazado las funciones de forma queda:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (4.81)$$

Y su forma incremental:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial t} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma \quad (4.82)$$

Reemplazando la ecuación constitutiva incremental:

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \frac{1}{3K_t^s} \mathbf{m} \mathbf{N}_p \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \frac{\partial \bar{\mathbf{g}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma \quad (4.83)$$

Podemos resumir el problema escribiendo el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{\mathbf{f}}^u}{\partial t} \quad (4.84)$$

Dónde se obtienen las matrices tangentes para ambas incógnitas del problema:

Matriz de Rigidez:	$\mathbf{K}_T = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} d\Omega$	(4.85)
--------------------	---	--------

Matriz de Acoplamiento :	$\mathbf{Q}_T = \frac{1}{3} \int_{\Omega} \frac{1}{K_t^s} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \mathbf{N}_p d\Omega$	(4.86)
--------------------------	--	--------

Vector de Fuerzas Nodales :	$\frac{\partial \bar{\mathbf{f}}^u}{\partial t} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \frac{\partial \bar{\mathbf{g}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma$	(4.87)
-----------------------------	---	--------

Ó expresado a partir de la discretización en elementos y su posterior ensamblado:

$$\mathbb{E}_e \mathbf{K}_T^{(e)} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbb{E}_e \mathbf{Q}_T^{(e)} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \mathbb{E}_e \frac{\partial \bar{\mathbf{f}}^{u(e)}}{\partial t} \quad (4.88)$$

Dónde se pueden identificar las expresiones de las siguientes matrices típicas:

Matriz de Rigidez Elemental:	$\mathbf{K}_T^{(e)} = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} d\Omega$	(4.89)
------------------------------	---	--------

Matriz de Acoplamiento Elemental:	$\mathbf{Q}_T^{(e)} = \frac{1}{3} \int_{\Omega^e} \frac{1}{K_t^s} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \mathbf{N}_p d\Omega$	(4.90)
-----------------------------------	--	--------

Vector de Fuerzas Nodales Elemental:	$\frac{\partial \bar{\mathbf{f}}^{u(e)}}{\partial t} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \frac{\partial \bar{\mathbf{g}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma$	(4.91)
--------------------------------------	--	--------

4.2.2. El Problema de Flujo no Saturado en Medio Poroso Deformable

La forma integral del problema de flujo no saturado obtenida a través del método de los residuos ponderados, se escribe:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \left\{ \nabla \cdot [-\mathbf{K}(S_r) \nabla p] + \nabla \cdot [\rho^w \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g}] + S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n S_r}{K^w} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \right\} d\Omega + \\ + \int_{\Gamma} \overline{\mathbf{w}}^T \left\{ [\mathbf{K}(S_r)(-\nabla p + \rho^w \mathbf{g})]^T \mathbf{n} - q^w \right\} d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.92)$$

Se aplica la integración por partes y el teorema de la divergencia de Green a los dos primeros términos de la primera integral en (4.92), es decir:

$$\int_{\Omega} \mathbf{w}^T \nabla \cdot [-\mathbf{K}(S_r) \nabla p] d\Omega = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p \mathbf{n} d\Gamma \quad (4.93)$$

$$\int_{\Omega} \mathbf{w}^T \nabla \cdot [\mathbf{K}(S_r) \rho^w \mathbf{g}] d\Omega = - \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \rho^w \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} \mathbf{n} d\Gamma \quad (4.94)$$

Reemplazando y eligiendo $\mathbf{w} = -\overline{\mathbf{w}}$, resulta:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p \mathbf{n} d\Gamma - \\ - \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega + \int_{\Gamma} \rho^w \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} \mathbf{n} d\Gamma + \\ + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T S_r \frac{\partial n}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \frac{n S_r}{K^w} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \\ + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p \mathbf{n} d\Gamma - \int_{\Gamma} \rho^w \mathbf{w}^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} \mathbf{n} d\Gamma + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T q^w d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.95)$$

Simplificando el segundo y cuarto términos con el octavo y noveno resulta:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p d\Omega - \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega \\ + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T S_r \frac{\partial n}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \frac{n S_r}{K^w} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T q^w d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (4.96)$$

Colocando las incógnitas a la izquierda y los datos a la derecha se obtiene:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \nabla p d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T S_r \frac{\partial n}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{w}^T \frac{n S_r}{K^w} \frac{\partial p}{\partial t} d\Omega = \\ = \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{w})^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{w}^T q^w d\Gamma \end{aligned} \quad (4.97)$$

4.2.2.1. Funciones de Forma para el Problema Hidráulico

Como no se puede resolver el problema de forma exacta, obteniendo la función de presión negativa de poro de agua (succión), se discretiza el medio continuo en estudio dividiéndolo en porciones llamadas elementos finitos. Así, a partir de ahora aproximamos las presiones de poro, poniéndolas en función del valor de la presión en los nodos de los elementos finitos:

$$p \cong \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}} \Rightarrow \nabla p \cong \nabla \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}} \quad (4.98)$$

$$\mathbf{u} \cong \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}} \quad (4.99)$$

Donde:

p : Es el campo de presiones de poro de agua.

$\bar{\mathbf{p}}$: Vector de valores de presiones de poro en los nodos de los elementos.

\mathbf{N}_p : Es la función de forma elegida para las presiones de poro.

\mathbf{u} : Es el campo de desplazamientos dentro del elemento.

$\bar{\mathbf{u}}$: Es el vector de desplazamientos nodales.

\mathbf{N}_u : Es la función de forma elegida para los desplazamientos.

Se eligen como funciones de peso a las funciones de forma en lo que constituye la formulación de Galerkin.

$$\mathbf{w}^T = \mathbf{N}_p^T \quad (4.100)$$

Además:

$$n = \varepsilon_v = \mathbf{m}^T \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{m}^T \mathbf{L} \mathbf{u} = \mathbf{m}^T \mathbf{L} \mathbf{N}_u \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{m}^T \mathbf{B} \bar{\mathbf{u}} \quad (4.101)$$

Se puede expresar de manera incremental la siguiente expresión:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mathbf{m}^T \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \quad (4.102)$$

Reemplazando en la (4.97) las funciones de peso, y la ecuación constitutiva mecánica (4.78) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}} d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} d\Omega + \\
 & + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} (\mathbf{N}_p) \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T \frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p) \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} d\Omega = \\
 & = \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} (\mathbf{N}_p)^T q^w d\Gamma
 \end{aligned} \tag{4.103}$$

Reordenando términos:

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} d\Omega + \\
 & + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} (\mathbf{N}_p) \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T \frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p) \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} d\Omega + \\
 & + \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p \bar{\mathbf{p}} d\Omega = \\
 & = \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} (\mathbf{N}_p)^T q^w d\Gamma
 \end{aligned} \tag{4.104}$$

Con lo cual se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} + \mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} - \mathbf{f}^p = \mathbf{0} \tag{4.105}$$

Donde quedan identificadas las siguientes matrices:

Matriz de Acoplamiento	$\mathbf{P} = \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} d\Omega$	(4.106)
------------------------	---	---------

Matriz de Compresibilidad	$\mathbf{S} = \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} (\mathbf{N}_p) d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T \frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p) d\Omega$	(4.107)
---------------------------	--	---------

Matriz de Permeabilidad	$\mathbf{H} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p d\Omega$	(4.108)
-------------------------	--	---------

Vector de Caudales Nodales	$\mathbf{f}^p = \int_{\Omega} \rho^w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} (\mathbf{N}_p)^T q^w d\Gamma$	(4.109)
----------------------------	---	---------

Ahora bien considerando una discretización por elementos finitos:

$$\mathbb{E}_e \mathbf{P}^{(e)} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbb{E}_e \mathbf{S}^{(e)} \frac{d \bar{\mathbf{p}}}{dt} + \mathbb{E}_e \mathbf{H}^{(e)} \bar{\mathbf{p}} = \mathbb{E}_e \mathbf{f}^{p(e)} \quad (4.110)$$

Dónde: \mathbb{E}_e , es el operador de ensamblaje y simboliza la contribución de cada elemento al sistema de ecuaciones global del continuo.

Obviamente: $\mathbf{P} = \mathbb{E}_e \mathbf{P}^{(e)}$; $\mathbf{H} = \mathbb{E}_e \mathbf{H}^{(e)}$; $\mathbf{S} = \mathbb{E}_e \mathbf{S}^{(e)}$ y $\mathbf{f}^p = \mathbb{E}_e \mathbf{f}^{p(e)}$.

Para resaltar la no linealidad del problema podemos escribir:

$$\mathbf{P}(\bar{\mathbf{p}}) \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S}(\bar{\mathbf{p}}) \frac{d \bar{\mathbf{p}}}{dt} + \mathbf{H}(\bar{\mathbf{p}}) \bar{\mathbf{p}} - \mathbf{f}^p = \mathbf{0} \quad (4.111)$$

Donde todas las matrices serán operadores tangentes.

A nivel elemental se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{Matriz de Acoplamiento Elemental} & \mathbf{P}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} d\Omega \end{array} \quad (4.112)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Matriz de Compresibilidad Elemental} & \mathbf{S}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} (\mathbf{N}_p) d\Omega + \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T \frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p) d\Omega \end{array} \quad (4.113)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Matriz de Permeabilidad Elemental} & \mathbf{H}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p d\Omega \end{array} \quad (4.114)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Vector de Caudales Nodales Elemental} & \mathbf{f}^{p(e)} = \int_{\Omega^e} \rho^w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma^e} (\mathbf{N}_p)^T q^w d\Gamma \end{array} \quad (4.115)$$

4.2.3. Formulación u-p del Problema de Flujo en Medio Poroso Deformable

Habiendo tenido en cuenta en la relación constitutiva mecánica el efecto de las dos variables de estado tensión total y presión negativa de poros (o más general tensión neta y succión); y además considerando que en el problema hidráulico existen deformaciones se llega a la formulación del problema acoplado conocida como formulación **u-p** (Zienkiewicz, et al., 1990a; Zienkiewicz, et al., 1990b) donde **u** son los desplazamientos y **p** la presión negativa de poros. En el presente problema, las matrices de acoplamiento son **Q** y **P** (4.90) y (4.112).

Así, habiendo aplicado el Método de los Elementos Finitos, obtenemos el siguiente sistema no lineal de ecuaciones diferenciales semi-discreto:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} \\ \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} + \mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{f}^p \end{cases} \quad (4.116)$$

Este sistema de ecuaciones lo podemos expresar en forma matricial como sigue:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_T & \mathbf{Q}_T \\ \mathbf{P} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\mathbf{f}^u / dt \\ \mathbf{f}^p \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

Donde, llamando a cada matriz:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_T & \mathbf{Q}_T \\ \mathbf{P} & \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad (4.118)$$

Evidentemente estas matrices son no simétricas. Llamando además:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix}, \quad \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} d\mathbf{f}^u / dt \\ \mathbf{f}^p \end{bmatrix} \quad (4.119)$$

El problema de flujo en medio poroso deformable, se puede escribir de manera más compacta:

$$\mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{F} \quad (4.120)$$

4.2.4. Discretización Temporal del Problema Acoplado

Como vimos, podemos escribir el sistema de ecuaciones del problema como en (4.120). Donde la incógnita es el vector \mathbf{X} que contiene a las incógnitas: $\bar{\mathbf{u}}$ desplazamiento y $\bar{\mathbf{p}}$ presión poros en los nodos de la malla de elementos finitos. Su derivada temporal puede expresarse mediante diferencias finitas de primer orden hacia adelante:

$$\left(\frac{d\mathbf{X}}{dt} \right)_{n+\theta} = \frac{\mathbf{X}_{n+1} - \mathbf{X}_n}{\Delta t} \quad (4.121)$$

Y el valor de la incógnita en el punto $n + \theta$, es:

$$\mathbf{X}_{n+\theta} = (1 - \theta)\mathbf{X}_n + \theta\mathbf{X}_{n+1} \quad (4.122)$$

Reemplazando (4.121) y (4.122) en la ecuación (4.120) y multiplicando ambos miembros por Δt , se obtiene:

$$\mathbf{C}[(1 - \theta)\mathbf{X}_n + \theta\mathbf{X}_{n+1}]_{n+\theta} \Delta t + \mathbf{D} \left[\frac{\mathbf{X}_{n+1} - \mathbf{X}_n}{\Delta t} \right]_{n+\theta} \Delta t = \mathbf{F}_{n+\theta} \Delta t \quad (4.123)$$

Reordenando se puede escribir:

$$[\mathbf{C}(1 - \theta)]_{n+\theta} \Delta t \mathbf{X}_n + [\mathbf{C}\theta]_{n+\theta} \Delta t \mathbf{X}_{n+1} + [\mathbf{D}]_{n+\theta} \mathbf{X}_{n+1} - [\mathbf{D}]_{n+\theta} \mathbf{X}_n = \mathbf{F}_{n+\theta} \Delta t \quad (4.124)$$

Colocando las incógnitas en el lado izquierdo de la igualdad:

$$[\mathbf{C}\theta\Delta t + \mathbf{D}]_{n+\theta} \mathbf{X}_{n+1} = [\mathbf{D} - \mathbf{C}(1 - \theta)\Delta t]_{n+\theta} \mathbf{X}_n + \mathbf{F}_{n+\theta}\Delta t \quad (4.125)$$

Sistema de ecuaciones con el cual calculamos \mathbf{X}_{n+1} , a partir de los valores de \mathbf{X}_n y $\mathbf{F}_{n+\theta}$. Se trata de un método implícito por tener que resolver un sistema de ecuaciones en cada paso de tiempo.

Δt es el intervalo de tiempo entre \mathbf{X}_n y \mathbf{X}_{n+1} , el parámetro θ varía entre 0 y 1.

Expandiendo la solución obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_T & \mathbf{Q}_T \\ \mathbf{P} & \mathbf{H}\theta\Delta t + \mathbf{S} \end{bmatrix}_{n+\theta} \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{Bmatrix}_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_T & \mathbf{Q}_T \\ \mathbf{P} & \mathbf{S} - \mathbf{H}(1 - \theta)\Delta t \end{bmatrix}_{n+\theta} \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{u}} \\ \bar{\mathbf{p}} \end{Bmatrix}_n + \Delta t \begin{Bmatrix} d\mathbf{f}^u / dt \\ \mathbf{f}^p \end{Bmatrix}_{n+\theta} \quad (4.126)$$

Queda un sistema de ecuaciones no simétrico.

4.2.4.1. Estrategia de Implementación

El sistema de ecuaciones obtenido hasta aquí puede manipularse un poco para favorecer la implementación de la siguiente manera, sea:

$$\mathbf{CX} + \mathbf{D} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{F} \quad (4.127)$$

La ecuación a discretizar en el tiempo, se puede escribir:

$$\mathbf{C}[(1-\theta)\mathbf{X}_n + \theta\mathbf{X}_{n+1}]_{n+\theta} + \mathbf{D}\left[\frac{\mathbf{X}_{n+1} - \mathbf{X}_n}{\Delta t}\right]_{n+\theta} = \mathbf{F}_{n+\theta} \quad (4.128)$$

Adoptando el esquema de Crank-Nicholson: $\theta = \frac{1}{2}$

$$\mathbf{C}\left[\frac{1}{2}\mathbf{X}_n + \frac{1}{2}\mathbf{X}_{n+1}\right]_{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{D}\left[\frac{\mathbf{X}_{n+1} - \mathbf{X}_n}{\Delta t}\right]_{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{F}_{n+\frac{1}{2}} \quad (4.129)$$

O bien:

$$\frac{\mathbf{C}}{2}\mathbf{X}_n + \frac{\mathbf{C}}{2}\mathbf{X}_{n+1} + \frac{\mathbf{D}}{\Delta t}\mathbf{X}_{n+1} - \frac{\mathbf{D}}{\Delta t}\mathbf{X}_n = \mathbf{F}_{n+\frac{1}{2}} \quad (4.130)$$

Dejando las incógnitas del lado izquierdo de la igualdad:

$$\left(\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{C}}{2}\right)\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+\frac{1}{2}} + \left(\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} - \frac{\mathbf{C}}{2}\right)\mathbf{X}_n \quad (4.131)$$

Llamando:

$$\mathbf{A} = \left(\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{C}}{2}\right) \quad y \quad \mathbf{B} = \left(\frac{\mathbf{D}}{\Delta t} - \frac{\mathbf{C}}{2}\right) \quad (4.132)$$

Finalmente se obtiene la llamada ecuación monolítica:

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{F}_{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}\mathbf{X}_n \quad (4.133)$$

4.2.4.2. Procedimiento Escalonado para resolver la Formulación Acoplada

La ecuación monolítica (4.133) puede resolverse de manera acoplada o bien alternativamente mediante una técnica denominada procedimiento escalonado (Staggered Procedure) que se presenta a continuación.

En primer lugar se particiona la matriz \mathbf{A} de la (4.133) en la forma:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^L + \mathbf{A}^R \quad (4.134)$$

$$\mathbf{A}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{a}_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}^R = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \quad (4.135)$$

De esta forma la ecuación (4.133) se puede escribir:

$$\mathbf{A}^L \mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{B} \mathbf{X}_n + \mathbf{F} - \mathbf{A}^R \mathbf{X}_{n+1} \quad (4.136)$$

Después de ciertos arreglos se obtiene:

$$\mathbf{x}_{n+1} = -\mathbf{G}_1 \mathbf{y}_{n+1} + \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_n + \mathbf{f}_1 \quad (4.137)$$

$$\mathbf{y}_{n+1} = -\mathbf{G}_2 \mathbf{x}_{n+1} + \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_n + \mathbf{f}_2 \quad (4.138)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{n+1} &= [\mathbf{x}_{n+1,K}, \mathbf{y}_{n+1,K}]^T \\ \mathbf{f} &= [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2]^T; \quad \mathbf{f}_1 = \mathbf{a}_{11}^{-1} \mathbf{F}_1; \quad \mathbf{f}_2 = \mathbf{a}_{22}^{-1} \mathbf{F}_2; \end{aligned} \quad (4.139)$$

$$\mathbf{G}_1 = \mathbf{a}_{11}^{-1} \mathbf{a}_{12}; \quad \mathbf{G}_2 = \mathbf{a}_{22}^{-1} \mathbf{a}_{21};$$

$$\mathbf{H}_1 = \mathbf{a}_{11}^{-1} [\mathbf{b}_{11}, \mathbf{b}_{12}]^T; \quad \mathbf{H}_2 = \mathbf{a}_{22}^{-1} [\mathbf{b}_{21}, \mathbf{b}_{22}]^T;$$

El proceso de iteración escalonado se define generalmente como a continuación. Primero se debe calcular el valor de \mathbf{x}_{n+1} que aparece en la ecuación (4.137) asumiendo una relación constitutiva lineal. Este valor sería $\mathbf{x}_{n+1,0}$ y con este valor se calcula el valor de $\mathbf{y}_{n+1,0}$ con la ecuación (4.138) y se substituye en la ecuación (4.137) para obtener $\mathbf{x}_{n+1,1}$. Este último valor se utiliza ahora como predictor en la ecuación (4.136). El proceso se repite hasta alcanzar la tolerancia fijada. El paso final es cuando se calcula $\mathbf{y}_{n+1,K}$, entonces:

$$\mathbf{X}_{n+1} = [\mathbf{x}_{n+1,K}, \mathbf{y}_{n+1,K}] \quad (4.140)$$

El predictor $\mathbf{x}_{n+1,0}$ tiene la forma:

$$\mathbf{x}_{n+1,0} = \sum_{i=0}^m \beta_i \mathbf{x}_{n-1,K} \quad (4.141)$$

Donde K es el número de iteraciones realizadas.

4.2.5. Discretización Temporal del Problema Desacoplado

La alternativa más sencilla para implementar el problema es resolverlo de manera desacoplada. Para ello, en lo que a la componente mecánica se refiere, consideramos conocido el campo de presiones de poro. Por otro lado, en la componente hidráulica, se considera conocido el campo de desplazamientos.

4.2.5.1. Discretización Temporal del Problema Mecánico

Como vimos, podemos describir el problema mecánico como sigue:

$$\mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} \quad (4.142)$$

Suponiendo que el campo de presiones de poro es conocido, podemos colocarlo a la derecha de la igualdad:

$$\mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} - \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} \quad (4.143)$$

La incógnita es el vector $\bar{\mathbf{u}}$. Su derivada temporal puede escribirse mediante diferencias finitas de primer orden hacia adelante como:

$$\left(\frac{d\bar{\mathbf{u}}}{dt} \right)_{n+\theta} = \frac{\bar{\mathbf{u}}_{n+1} - \bar{\mathbf{u}}_n}{\Delta t} \quad (4.144)$$

El valor de la incógnita en el punto $n + \theta$, es:

$$\bar{\mathbf{u}}_{n+\theta} = (1 - \theta)\bar{\mathbf{u}}_n + \theta\bar{\mathbf{u}}_{n+1} \quad (4.145)$$

Reemplazando en la ecuación (4.143), multiplicando ambos miembros por Δt y colocando las incógnitas a la izquierda, se obtiene:

$$[\mathbf{K}]_{n+\theta} \bar{\mathbf{u}}_{n+1} = \left(\frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} \right)_{n+\theta} \Delta t - [\mathbf{K}]_{n+\theta} \bar{\mathbf{u}}_n - \mathbf{Q} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} \Delta t \quad (4.146)$$

Sistema de ecuaciones con el cual calculamos $\bar{\mathbf{u}}_{n+1}$, a partir de los valores de $\bar{\mathbf{u}}_n$, $(\partial \mathbf{f}^u / \partial t)_{n+\theta}$, Δt , $[\mathbf{K}]_{n+\theta}$ y $\mathbf{Q} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t}$. El parámetro θ varía entre 0 y 1.

4.2.5.2. Discretización Temporal del Problema Hidráulico

Como vimos, podemos describir el problema hidráulico como sigue:

$$\mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} + \mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} - \mathbf{f}^p = \mathbf{0} \quad (4.147)$$

Vamos a suponer que el campo de desplazamientos es conocido, así:

$$\mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \mathbf{f}^p - \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \quad (4.148)$$

Donde la incógnita es el vector $\bar{\mathbf{p}}$. Su derivada temporal puede expresarse mediante diferencias finitas de primer orden hacia adelante como:

$$\left(\frac{d\bar{\mathbf{p}}}{dt} \right)_{n+\theta} = \frac{\bar{\mathbf{p}}_{n+1} - \bar{\mathbf{p}}_n}{\Delta t} \quad (4.149)$$

Y el valor de la incógnita en el punto $n + \theta$, es:

$$\bar{\mathbf{p}}_{n+\theta} = (1 - \theta) \bar{\mathbf{p}}_n + \theta \bar{\mathbf{p}}_{n+1} \quad (4.150)$$

Reemplazando en la ecuación (4.148) y multiplicando ambos miembros por Δt , se obtiene:

$$\mathbf{H} \left[(1 - \theta) \bar{\mathbf{p}}_n + \theta \bar{\mathbf{p}}_{n+1} \right]_{n+\theta} \Delta t + \mathbf{S} \left[\frac{\bar{\mathbf{p}}_{n+1} - \bar{\mathbf{p}}_n}{\Delta t} \right]_{n+\theta} \Delta t = \mathbf{f}^p_{n+\theta} \Delta t - \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \Delta t \quad (4.151)$$

Reordenando podemos escribir:

$$[\mathbf{H}(1 - \theta)]_{n+\theta} \Delta t \bar{\mathbf{p}}_n + [\mathbf{H}\theta]_{n+\theta} \Delta t \bar{\mathbf{p}}_{n+1} + [\mathbf{S}]_{n+\theta} \bar{\mathbf{p}}_{n+1} - [\mathbf{S}]_{n+\theta} \bar{\mathbf{p}}_n = \mathbf{f}^p_{n+\theta} \Delta t - \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \Delta t \quad (4.152)$$

Colocando las incógnitas en el miembro izquierdo:

$$[\mathbf{H}\theta\Delta t + \mathbf{S}]_{n+\theta} \bar{\mathbf{p}}_{n+1} = [\mathbf{S} - \mathbf{H}(1-\theta)\Delta t]_{n+\theta} \bar{\mathbf{p}}_n + \mathbf{f}^p_{n+\theta}\Delta t - \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \Delta t \quad (4.153)$$

Sistema de ecuaciones con el cual calculamos $\bar{\mathbf{p}}_{n+1}$, a partir de los valores de $\bar{\mathbf{p}}_n$ y $\mathbf{f}^p_{n+\theta}\Delta t - \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} \Delta t$.

Δt es el intervalo de tiempo entre $\bar{\mathbf{p}}_n$ y $\bar{\mathbf{p}}_{n+1}$, el parámetro θ varía entre 0 y 1.

4.2.6. Matrices del Método de los Elementos Finitos para el caso de Elemento Triángulo Lineal de 3 Nodos

Por su simplicidad en cuanto a implementación se eligen elementos triangulares lineales (isoparamétricos) para modelar tanto el campo de presiones de poro como el campo de desplazamientos. La presión de poros introduce un grado de libertad por nodo del elemento. Como alternativa el programa permite trabajar con elementos cuadráticos, por este motivo se incluyen además las expresiones del elemento cuadrático triangular isoparamétrico para modelar los desplazamientos. El uso de elementos lineales para las presiones y cuadráticos para los desplazamientos es necesario sobre todo cuando se trabaja en condición no drenada, donde la matriz de permeabilidad y la de compresibilidad se anulan (Zienkiewicz, et al., 1990a). En dichos casos hay limitaciones para aproximar las funciones \mathbf{N}_p y \mathbf{N}_u si se satisfacen las condiciones de convergencia de (Babuska, 1971; Babuska, 1973; Brezzi, 1974). Debido a que se trabaja con derivadas respecto del espacio en los operadores, las funciones de forma deben ser al menos lineales (C_0), es decir, continuas y derivables (Zienkiewicz & Taylor, 1989).

4.2.6.1. Campo de Presión de Poros (Succión). Elemento Lineal.

El vector de presión de poros en los nodos del elemento es:

$$\bar{\mathbf{p}} = [p_1 \quad p_2 \quad p_3]^T \quad (4.154)$$

Función de forma de la presión de poros se denota:

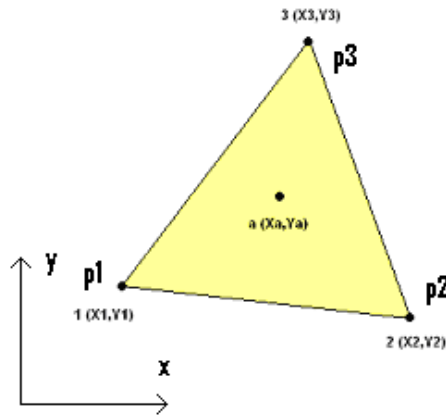


Figura 4.2 – Campo de succión: *Elemento lineal de 3 nodos*

$$\mathbf{N}_p = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \quad (4.155)$$

La aproximación del campo de presiones de poro mediante funciones de forma y valores nodales de presiones de poro queda expresada:

$$p = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} \quad (4.156)$$

Dentro del elemento la presión de poros se aproxima mediante una función polinómica lineal, es decir:

$$p(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (4.157)$$

Para obtener las constantes $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, reemplazamos los valores de las coordenadas de los nodos, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{cases} p_1(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 y_1 \\ p_2(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x_2 + \alpha_2 y_2 \\ p_3(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x_3 + \alpha_2 y_3 \end{cases} \quad (4.158)$$

Resolviéndolo se obtiene:

$$p(x, y) = \frac{1}{2A} [(a_1 + b_1x + c_1y)p_1 + (a_2 + b_2x + c_2y)p_2 + (a_3 + b_3x + c_3y)p_3] \quad (4.159)$$

Generalizando podemos escribir, las funciones de forma como:

$$N_i(x, y) = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad \text{con} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.160)$$

Donde A, es el área del elemento y se puede calcular como:

$$2A = \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \quad (4.161)$$

Las derivadas de las funciones de forma quedan:

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} = \frac{b_i}{2A} \quad (4.162)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial y} = \frac{c_i}{2A} \quad (4.163)$$

Matriz gradiente de las funciones de forma de presiones de poro:

$$\nabla \mathbf{N}_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} [N_1 \quad N_2 \quad N_3] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{2A} & \frac{b_2}{2A} & \frac{b_3}{2A} \\ \frac{c_1}{2A} & \frac{c_2}{2A} & \frac{c_3}{2A} \end{bmatrix} \quad (4.164)$$

Operadores matriciales divergencia y gradiente, en 2D:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Operador matricial divergencia

Operador matricial gradiente

4.2.6.2. Campo de Desplazamientos. Elemento Lineal.

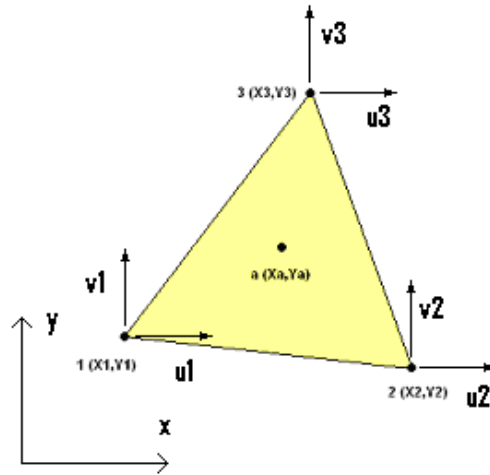


Figura 4.3 – Campo de desplazamientos: *Elemento triangulo lineal*

Para discretizar el campo de los desplazamientos se eligen al igual que para el caso de presiones de poro elementos triangulares lineales isoparamétricos. En este caso cada nodo del elemento presenta dos grados de libertad.

El vector de desplazamientos en los nodos del elemento es:

$$\bar{\mathbf{u}} = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3]^T \quad (4.165)$$

Función de forma de los desplazamientos:

$$\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad (4.166)$$

Aproximación del campo de desplazamientos mediante las funciones de forma y los valores nodales de desplazamientos:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (4.167)$$

Matriz de derivadas de las funciones deforma de desplazamientos:

$$\mathbf{B} = \mathbf{L}\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.168)$$

Matriz de permeabilidad en función del grado de saturación:

$$\mathbf{K}(S_r) = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (4.169)$$

Delta de Kronecker en notación matricial y 2D:

$$\mathbf{m} = [1 \quad 1 \quad 0]^T \quad (4.170)$$

4.2.6.3. Expresiones Matriciales para Elementos Lineales

El sistema de ecuaciones que resuelve el problema hidro-mecánico es el siguiente:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} \\ \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} + \mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{f}^p \end{cases} \quad (4.171)$$

Donde la matriz de rigidez elástica elemental no lineal es:

$$\mathbf{K}_T^{(e)} = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} d\Omega \quad (4.172)$$

O más explícitamente:

ó

La matriz de acoplamiento elemental es:

$$\mathbf{Q}_\Gamma^{(e)} = \int_\Omega \frac{1}{3K^s} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{E\nu}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E(1-\nu)}{2(1-\nu^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} [N_1 \quad N_2 \quad N_3] d\Omega \quad (4.176)$$

$$\mathbf{Q}^{(e)} = \int_{\Omega} \frac{(d_1 + d_2)}{3K^s} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_1}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_1}{\partial x} N_3 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} N_1 & \frac{\partial N_1}{\partial y} N_2 & \frac{\partial N_1}{\partial y} N_3 \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_2}{\partial x} N_3 \\ \frac{\partial N_2}{\partial y} N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial y} N_2 & \frac{\partial N_2}{\partial y} N_3 \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_3}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_3}{\partial x} N_3 \\ \frac{\partial N_3}{\partial y} N_1 & \frac{\partial N_3}{\partial y} N_2 & \frac{\partial N_3}{\partial y} N_3 \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.177)$$

El vector de fuerzas nodales elementales es:

$$\mathbf{f}^{u(e)} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u^T \rho \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u^T \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma \quad (4.178)$$

$$\mathbf{f}^{u(e)} = \int_{\Omega} \rho \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_1 \\ N_2 & 0 \\ 0 & N_2 \\ N_3 & 0 \\ 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -g \end{bmatrix} d\Omega + \int_{\Gamma} \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_1 \\ N_2 & 0 \\ 0 & N_2 \\ N_3 & 0 \\ 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} d\Gamma \quad (4.179)$$

$$\mathbf{f}^{u(e)} = -\rho g \int_{\Omega} \begin{bmatrix} 0 \\ N_1 \\ 0 \\ N_2 \\ 0 \\ N_3 \end{bmatrix} d\Omega + \int_{\Gamma} \begin{bmatrix} t_1 N_1 \\ t_2 N_1 \\ t_1 N_2 \\ t_2 N_2 \\ t_1 N_3 \\ t_2 N_3 \end{bmatrix} d\Gamma \quad (4.180)$$

La matriz de acoplamiento es:

$$\mathbf{P}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} d\Omega \quad (4.181)$$

$$\mathbf{P}^{(e)} = \int_{\Omega^e} S_r \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.182)$$

$$\mathbf{P}^{(e)} = \int_{\Omega^e} S_r \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_1}{\partial y} N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_2}{\partial y} N_1 & \frac{\partial N_3}{\partial x} N_1 & \frac{\partial N_3}{\partial y} N_1 \\ \frac{\partial N_1}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_1}{\partial y} N_2 & \frac{\partial N_2}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_2}{\partial y} N_2 & \frac{\partial N_3}{\partial x} N_2 & \frac{\partial N_3}{\partial y} N_2 \\ \frac{\partial N_1}{\partial x} N_3 & \frac{\partial N_1}{\partial y} N_3 & \frac{\partial N_2}{\partial x} N_3 & \frac{\partial N_2}{\partial y} N_3 & \frac{\partial N_3}{\partial x} N_3 & \frac{\partial N_3}{\partial y} N_3 \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.183)$$

La matriz de compresibilidad elemental es:

$$\mathbf{S}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T n \frac{\partial S_r}{\partial p} (\mathbf{N}_p) d\Omega + \int_{\Omega^e} (\mathbf{N}_p)^T \frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p) d\Omega \quad (4.184)$$

$$\mathbf{S} = \int_{\Omega} n C_s \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{n S_r}{K^w} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.185)$$

$$\mathbf{S} = \int_{\Omega} n C_s \begin{bmatrix} N_1 N_1 & N_1 N_2 & N_1 N_3 \\ N_2 N_1 & N_2 N_2 & N_2 N_3 \\ N_3 N_1 & N_3 N_2 & N_3 N_3 \end{bmatrix} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{n S_r}{K^w} \begin{bmatrix} N_1 N_1 & N_1 N_2 & N_1 N_3 \\ N_2 N_1 & N_2 N_2 & N_2 N_3 \\ N_3 N_1 & N_3 N_2 & N_3 N_3 \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.186)$$

La matriz de permeabilidad elemental es:

$$\mathbf{H}^{(e)} = \int_{\Omega^e} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p d\Omega \quad (4.187)$$

$$\mathbf{H}^{(e)} = \int_{\Omega^e} \frac{k_0}{\mu^I} (S_r)^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.188)$$

$$\mathbf{H}^{(e)} = \int_{\Omega^e} \frac{k_0}{\mu^I} (S_r)^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} \frac{\partial N_1}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \frac{\partial N_2}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \frac{\partial N_3}{\partial x} + \frac{\partial N_3}{\partial y} \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} d\Omega \quad (4.189)$$

Finalmente el vector de caudales nodales es:

$$\mathbf{f}^{p(e)} = \int_{\Omega^e} \rho^w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma^e} (\mathbf{N}_p)^T q^w d\Gamma \quad (4.190)$$

$$\mathbf{f}^{p(e)} = \int_{\Omega^e} \rho^w \frac{k_0}{\mu^I} (S_r)^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} d\Omega - \int_{\Gamma^e} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} q^w d\Gamma \quad (4.191)$$

$$\mathbf{f}^{p(e)} = \int_{\Omega^e} \rho^w g \frac{k_0}{\mu^l} (S_r)^3 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} d\Omega - \int_{\Gamma^e} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} q^w d\Gamma \quad (4.192)$$

El sistema de ecuaciones elemental se escribe:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{K}_T^{(e)}]_{6 \times 6} [d\bar{\mathbf{u}} / dt^{(e)}]_{6 \times 1} + [\mathbf{Q}_T^{(e)}]_{6 \times 3} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{3 \times 1} = [d\mathbf{f}^{u(e)} / dt]_{6 \times 1} \\ [\mathbf{P}^{(e)}]_{3 \times 6} [d\bar{\mathbf{u}} / dt^{(e)}]_{6 \times 1} + [\mathbf{S}]_{3 \times 3} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{3 \times 1} + [\mathbf{H}]_{3 \times 3} [\bar{\mathbf{p}}^{(e)}]_{3 \times 1} = [\mathbf{f}^{p(e)}]_{3 \times 1} \end{array} \right. \quad (4.193)$$

Y finalmente el sistema de ecuaciones ensamblado es:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{K}_T]_{(2n) \times (2n)} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{(2n) \times 1} + [\mathbf{Q}_T]_{(2n) \times (n)} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{(n) \times 1} = [d\mathbf{f}^u / dt]_{(2n) \times 1} \\ [\mathbf{P}]_{(n) \times (2n)} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{(2n) \times 1} + [\mathbf{S}]_{(n) \times (n)} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{(n) \times 1} + [\mathbf{H}]_{(n) \times (n)} [\bar{\mathbf{p}}]_{(n) \times 1} = [\mathbf{f}^p]_{(n) \times 1} \end{array} \right. \quad (4.194)$$

Donde $n = 3$ es el número de nodos para la succión y para los desplazamientos.

4.2.6.4. Campo de Desplazamientos. Elemento Cuadrático.

Como se ha comentado arriba, es habitual utilizar elementos cuadráticos para discretizar los desplazamientos. En este caso hay dos grados de libertad por nodo, desplazamientos según x e y . Los desplazamientos en los nodos del elemento se escriben:

$$\bar{\mathbf{u}} = [u_1 \quad v_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad u_4 \quad v_4 \quad u_5 \quad v_5 \quad u_6 \quad v_6]^T \quad (4.195)$$

La función de forma de los desplazamientos se escribe:

$$\mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 \end{bmatrix} \quad (4.196)$$

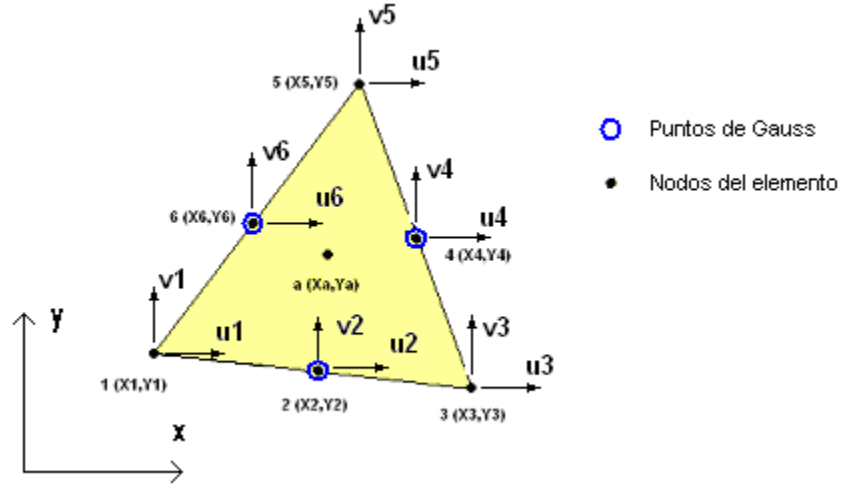


Figura 4.4 – Campo de desplazamientos: *Elemento triangulo cuadrático*

La aproximación del campo de desplazamientos mediante las funciones de forma y los valores nodales de desplazamientos se expresan de la siguiente manera:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ u_6 \\ v_6 \end{Bmatrix} \quad (4.197)$$

La matriz de derivadas de las funciones deforma de desplazamientos resulta:

$$\mathbf{B} = \mathbf{L} \mathbf{N}_u = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 \end{bmatrix} = \quad (4.198)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_5}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_6}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & \frac{\partial N_5}{\partial y} & \frac{\partial N_5}{\partial x} & \frac{\partial N_6}{\partial y} & \frac{\partial N_6}{\partial x} \end{bmatrix}$$

La matriz de permeabilidad en función del grado de saturación es:

$$\mathbf{K}(S_r) = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (4.199)$$

El Delta de Kronecker en notación matricial y en dos dimensiones es:

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.200)$$

4.2.6.5. Expresiones Matriciales para el caso de Combinar Elementos Lineales para la Presión de Poros y Elementos Cuadráticos para los Desplazamientos

El sistema de ecuaciones que resuelve el problema hidromecánico es independiente de los elementos elegidos para la aproximación numérica y es el siguiente:

$$\begin{cases} \mathbf{K}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{Q}_T \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{f}^u}{\partial t} \\ \mathbf{P} \frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \mathbf{S} \frac{\partial \bar{\mathbf{p}}}{\partial t} + \mathbf{H} \bar{\mathbf{p}} = \mathbf{f}^p \end{cases} \quad (4.201)$$

Donde la matriz de rigidez elástica no lineal es:

$$\mathbf{K}_T = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{B} d\Omega \quad (4.202)$$

La matriz de acoplamiento mecánica elemental es:

$$\mathbf{Q}_T = \frac{1}{3} \int_{\Omega} \frac{1}{K_t} \mathbf{B}^T \mathbf{D}_T \mathbf{m} \mathbf{N}_p d\Omega \quad (4.203)$$

El vector de fuerzas nodales es:

$$\frac{\partial \mathbf{f}^{u(e)}}{\partial t} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_u \rho \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{N}_u \frac{\partial \bar{\mathbf{t}}}{\partial t} d\Gamma \quad (4.204)$$

La matriz de acoplamiento hidráulica es:

$$\mathbf{P} = \int_{\Omega} (\mathbf{N}_p)^T S_r \mathbf{m}^T \mathbf{B} d\Omega \quad (4.205)$$

La matriz de compresibilidad es:

$$\mathbf{S} = \int_{\Omega} \left[\frac{n S_r}{K^w} (\mathbf{N}_p)^T \mathbf{N}_p + n C_s (\mathbf{N}_p)^T \mathbf{N}_p \right] d\Omega \quad (4.206)$$

La matriz de permeabilidad es:

$$\mathbf{H} = \int_{\Omega} (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \nabla \mathbf{N}_p d\Omega \quad (4.207)$$

Finalmente el vector de caudales nodales es:

$$\mathbf{f}^p = \int_{\Omega} \rho_w (\nabla \mathbf{N}_p)^T \mathbf{K}(S_r) \mathbf{g} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{N}_p^T q^w d\Gamma \quad (4.208)$$

El sistema de ecuaciones elemental, considerando elementos lineales para las succión nodal y elementos cuadráticos para los desplazamientos nodales resulta:

$$\begin{cases} [\mathbf{K}_T]_{12 \times 12} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{12 \times 1} - [\mathbf{Q}_T]_{12 \times 3} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{3 \times 1} = [d\mathbf{f}^u / dt]_{12 \times 1} \\ [\mathbf{P}]_{3 \times 12} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{12 \times 1} + [\mathbf{S}]_{3 \times 3} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{3 \times 1} + [\mathbf{H}]_{3 \times 3} [\bar{\mathbf{p}}]_{3 \times 1} = [\mathbf{f}^p]_{3 \times 1} \end{cases} \quad (4.209)$$

Y finalmente el sistema de ecuaciones global ensamblado es:

$$\begin{cases} [\mathbf{K}_T]_{(2m) \times (2m)} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{(2m) \times 1} + [\mathbf{Q}_T]_{(2m) \times (n)} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{(n) \times 1} = [d\mathbf{f}^u / dt]_{(2m) \times 1} \\ [\mathbf{P}]_{(n) \times (2m)} [d\bar{\mathbf{u}} / dt]_{(2m) \times 1} + [\mathbf{S}]_{(n) \times (n)} [d\bar{\mathbf{p}} / dt]_{(n) \times 1} + [\mathbf{H}]_{(n) \times (n)} [\bar{\mathbf{p}}]_{(n) \times 1} = [\mathbf{f}^p]_{(n) \times 1} \end{cases} \quad (4.210)$$

Donde $n = 3$ es el número de nodos para la succión y $m = 6$ es el número de nodos para los desplazamientos.

4.3. Modelo Numérico en MATLAB

En el Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, se ha trabajado previamente en la vertiente numérica en la adaptación de programas de cálculo existentes para que puedan simular el agrietamiento de suelos. Se han obtenido algunos resultados interesantes tanto con el código DRAC (Prat, et al., 1993), como con el programa Code_Bright¹³, ambos basados en el método de los elementos finitos. Por un lado, DRAC es un programa de cálculo que permite simular juntas en un medio continuo y su apertura o cierre en función del estado tensional. Si bien en su momento no resolvía el problema de flujo en medio poroso, se utilizó una analogía térmica para simular el proceso de agrietamiento (Prat, et al., 2002). Por otro lado, Code_Bright es un programa termo-hidro-mecánico para suelos no saturados, al que se le ha incorporado un modelo no tracción para poder estudiar el inicio del agrietamiento (Rodríguez, et al., 2007).

A pesar de los logros obtenidos, se vio desde un principio que era difícil adaptar los programas existentes para cubrir todo el proceso de agrietamiento, es decir, su iniciación y su propagación, incluyendo el efecto del agua en condiciones no saturadas. Por este motivo, se ha desarrollado una formulación matemática hidromecánica para modelar este complejo fenómeno, que ha sido implementada en el entorno MATLAB y que se ha mostrado eficaz para simular el comportamiento del suelo en diferentes etapas de secado y las diferentes características observadas experimentalmente en el laboratorio.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos de hardware. Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. Se ha elegido MATLAB por ser un entorno de trabajo con un lenguaje derivado de C++, que es el más idóneo y mayoritariamente utilizado para cálculo científico. Además, por la gran cantidad de librería existente y por ser un entorno habitual en ciencia. Finalmente, por su capacidad gráfica que evita tener que utilizar un post-procesador de los resultados.

¹³Code_Bright (Olivella, et al., 1996, Olivella, 1995) es un programa que permite realizar análisis termo-hidro-mecánicos en medios geológicos. Es un programa de elementos finitos desarrollado en el departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, combinado con el entorno de pre-post proceso GiD, desarrollado en el CIMNE.

https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright

4.3.1. Proceso de Implementación del Modelo

Se ha desarrollado un código de elementos finitos específico para el análisis del proceso de contracción y agrietamiento de suelos arcillosos. La finalidad de disponer de una herramienta de análisis como esta es poder comprender mejor el fenómeno de agrietamiento desde un punto de vista geotécnico. La hipótesis de partida es que la contracción se produce por efecto de la succión y que en el proceso los campos de tensiones en la matriz de suelo desarrollan estados de tensión que favorecen a la formación de grietas en ciertos casos. En esta primera etapa se restringe el análisis a comportamientos de deformación con componente marcadamente volumétrica y a mecanismos de agrietamiento debido a tracciones que producen un modo de apertura, conocido como modo I en la MFLE.

Debido a la complejidad de la implementación del modelo, se decidió comenzar implementándolo en dos dimensiones. El modelo bidimensional es suficiente para simular secciones transversales de bandejas rectangulares y secciones radiales de bandejas cilíndricas como las mostradas en la Figura 4.5 y Figura 4.6. Se estudia por tanto la evolución del proceso en la matriz del suelo y su interacción con el ambiente y las bandejas contenedoras mediante la aplicación de apropiadas condiciones de contorno en succión y desplazamientos.

El código se ha organizado en una serie de “subrutinas” que en MATLAB se conocen como funciones que realizan determinados cálculos e interactúan entre sí para obtener la solución de un determinado problema. La función principal contiene los datos del problema así como los parámetros y las propiedades que el modelo necesita para ser resuelto.

Se ha implementado una función “mallador” sencilla para las secciones rectangulares descritas arriba y que ha permitido la implementación del algoritmo de re-enumeración (remallado elemental) cuando se analiza la formación y propagación de una grieta.

Durante el desarrollo de la tesis se ha implementado primero el modelo mecánico con Ley Constitutiva basada en Superficies de Estado con el cual fue posible simular la contracción por agrietamiento conociendo el campo de succión aplicado a la geometría del suelo (Levatti, 2008).

Posteriormente se implementó el modelo hidráulico de flujo en medio poroso, que se acopló al problema mecánico para obtener la solución del problema de flujo en medio poroso deformable, específicamente la contracción por desecación (Levatti, 2012).

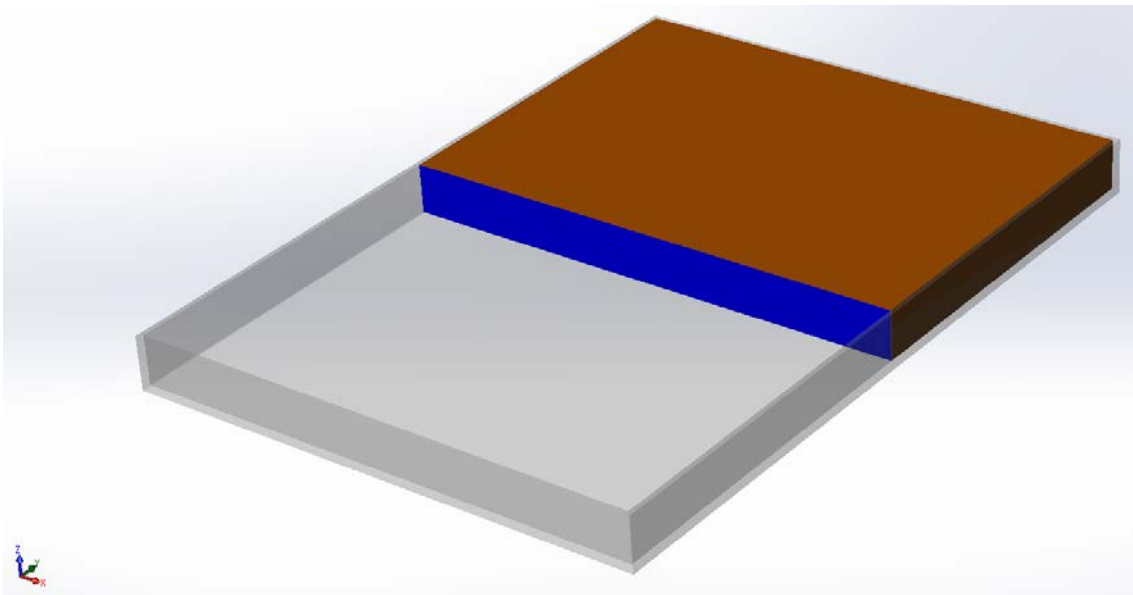


Figura 4.5 – Sección rectangular de la bandeja prismática de pequeño espesor que se estudia numéricamente. Las condiciones de contorno en desplazamiento se aplican a los borde de la sección en contacto con la bandeja. La condición de contorno en succión se aplica al borde de la sección en contacto con el ambiente.

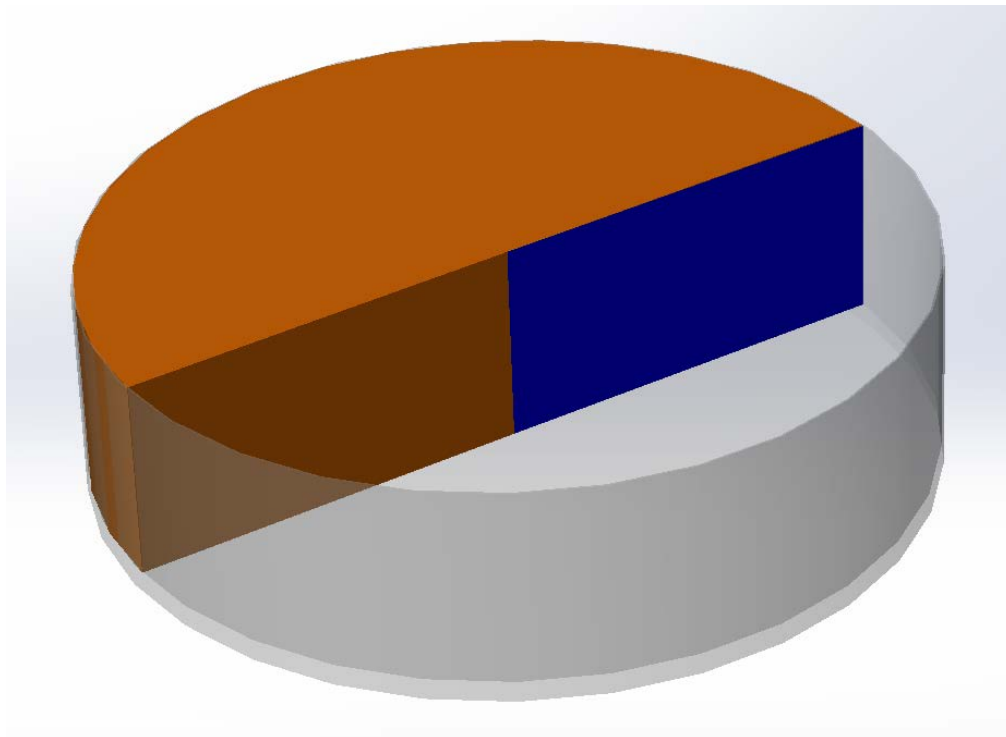


Figura 4.6 –Sección radial de una muestra cilíndrica de base circular que se estudia mediante el modelo numérico bidimensional. Las condiciones de contorno en desplazamiento se aplican a los borde de la sección en contacto con la bandeja. La condición de contorno en succión se aplica al borde de la sección en contacto con el ambiente.

En la presente tesis se utiliza el código hidro-mecánico al cual se le ha añadido la posibilidad de simular la iniciación y propagación de una grieta en el contorno. El código permite realizar análisis de tensiones sofisticados para una gran cantidad de condiciones de contorno que se corresponden con los ensayos realizados y permiten realizar análisis de lo que ocurre durante un proceso de desecación. La adición del tratamiento de grietas, que resulta fundamental, permite comprender lo que ocurre en el laboratorio durante el proceso de secado.

4.3.2. Deformación y Agrietamiento producidos en los Ensayos

El principal objetivo del modelo numérico, es confirmar que las grietas se forman y propagan debido al estado de tensiones inducidos por la desecación. El modelo reproduce la evolución de la succión y el estado de tensiones en la matriz de suelo resolviendo el problema de contorno hidromecánico. Aunque corresponde al apartado de análisis experimental, se presenta aquí el comportamiento general del suelo observado en los distintos ensayos realizados. Se presta especial atención a la iniciación y propagación de las grietas para exponer luego cuales son las posibilidades de análisis con el código y cuál es la estrategia utilizada para la investigación numérica.

Existe una tendencia, en la literatura respecto de la formación y propagación de las grietas por desecación, que tiende a simplificar el comportamiento de las fisuras y la deformación. *Las grietas comienzan en el centro de la capa de suelo y propagan hacia la superficie o hacia el fondo* (Corte & Higashi, 1960). *Las grietas se inician generalmente en la superficie del terreno donde hay mayor tensión* (Lachenbruch, 1961). *El suelo se seca generalmente hacia abajo desde la superficie, donde la matriz de succión es generalmente mayor y las tensiones debido a peso propio son cero* (Morris, et al., 1992). *Durante la desecación las grietas comienzan desde el fondo y propagan verticalmente hacia la superficie y lateralmente hacia grietas adyacentes* (Weinberger, 1999). Generalmente se habla de un suelo particular, o ensayos particulares o descripciones particulares que se desarrollan en el campo.

En esta tesis se presentan resultados experimentales de desecación de suelo en bandejas prismáticas de base rectangular de pequeño espesor (1-2 cm) de diferentes relaciones de lados. En estos ensayos las grietas propagan horizontalmente y se desarrollan generalmente a lo largo de todo el espesor de la muestra. En general, las grietas comienzan a aparecer primero en parte de los contornos y luego propagan desde los bordes hacia el centro de la muestra. También se producen grietas capilares sobre todo cuando el tamaño inicial de las partículas con las que se

prepara el lodo fluido es más grande. En bandejas rectangulares, a pesar del predominio de dos dimensiones (ancho y largo) sobre la tercera (altura), se producen redes de grietas complejas y de carácter tridimensional. En bandejas alargadas, donde predomina solo una de las dimensiones del espacio, se producen grietas más o menos paralelas y grietas transversales a las primeras, pero que sin embargo siguen teniendo un carácter tridimensional que las hace difícil de simular. Cuando la relación de lados es próxima a 1, el primer sistema de grietas tiende a ser un sistema de grietas paralelas que se combinan con un sistema de grietas secundarias que resultan aproximadamente perpendiculares al sistema primario. La humedad migra hacia el exterior escapando por los contornos de las bandejas dejando una mancha húmeda que se va reduciendo hacia el centro de la bandeja. En algunos ensayos se nota un sistema de grietas más denso en la zona que ha secado más lentamente debido a que en dichas zonas hay más energía disponible para producir agrietamiento. Se ha comprobado que los polígonos de 4 y 5 lados son los que dominan la morfología final de las grietas.

En la experiencia de laboratorio con bandejas cilíndricas (80 y 40 cm de diámetro, 20 y 10 cm de altura), las grietas primarias comenzaron, prácticamente en todos los casos, en cualquier punto de los bordes en contacto con las bandejas contenedoras. Algunas grietas secundarias o terciarias comenzaron en la superficie, otras desde el fondo y algunas desde el centro de la masa de suelo. La propagación a veces fue en dirección más o menos vertical, pero a veces en dirección horizontal, o siguiendo la curvatura del borde de la bandeja. Unas grietas fueron radiales y rectas, otras diametrales y rectas, otras curvas y más o menos concéntricas entre sí. Algunas grietas alcanzaron a abarcar toda la altura de la muestra y otras no.

La grietas en los bordes en contacto con la bandeja, iniciadas en el borde superior y que se propagan hacia abajo más o menos verticales, son las más sencillas de simular en 2D y son precisamente las que se presentan en el siguiente capítulo de la presente tesis.

También son relativamente sencillas, las grietas iniciadas en la superficie inferior y que se propagan hacia arriba (verticales y con curvas hacia los bordes).

4.3.3. Posibilidades de Análisis del Código

El código hidromecánico implementado para esta tesis ha resultado útil para analizar situaciones hipotéticas y reales donde no se producen grietas o bien las grietas tienen un carácter estático, es decir, no evolucionan con el tiempo.

Con el código de elementos finitos se puede analizar geometrías bidimensionales como las secciones mostradas en la Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9. Si se quiere estudiar lo que sucede en la punta de una grieta con gran exactitud se debe densificar la malla con algunos criterios prácticos relativos a la dimensión de la grieta. Si a es la longitud de la grieta el tamaño de los elementos debería ser de $a/200$ a $a/40$ (Meinhard, 2013). Este criterio no es fijo sino que viene de la experiencia en MF en materiales distintos a la arcilla. Una vez se trabaje un tiempo con suelos utilizando estos conceptos, surgirán criterios propios de la fractura específicos para el análisis de grietas por desecación en suelos.

4.3.3.1. Condiciones de Contorno del Problema de Desecación de Suelos

En la Figura 4.7 se muestran los esquemas con los que se han estudiado el comportamiento del modelo numérico para comprender lo que sucede en el laboratorio. Como puede observarse en dicha figura los esquemas utilizados tienen un código que los identifica. La primera parte de dicho código significa condición de contorno (Condición de Contorno **CC01-CC17**) y son 17 casos distintos de CC01 a CC17. La segunda parte indica la condición de succión impuesta (Presión negativa en el Contorno **PC01-PC07**) y son 7 casos distintos.

En los esquemas mencionados, la línea roja en los contornos indica donde se impone la succión y mientras no se diga lo contrario este valor es constante. Las condiciones de contorno en desplazamientos se simbolizan con los vínculos móviles y fijos tradicionales de la Estática y la Resistencia de Materiales.

Para el caso particular del análisis de las grietas centrales, se han utilizado los esquemas presentados en la Figura 4.8, donde la línea roja indica donde se impone el valor de succión que hace a la muestra evolucionar con el tiempo.

Para el estudio del arqueado se utilizaron los 3 esquemas que se muestran en la Figura 4.9.

Finalmente, para el análisis del secado rápido se ha utilizado los esquemas de la Figura 4.10, donde la condición de contorno en succión es especial y se intensifica en ciertas zonas para reproducir el efecto de la temperatura concentrada en dos focos opuestos sobre la muestra de suelo.

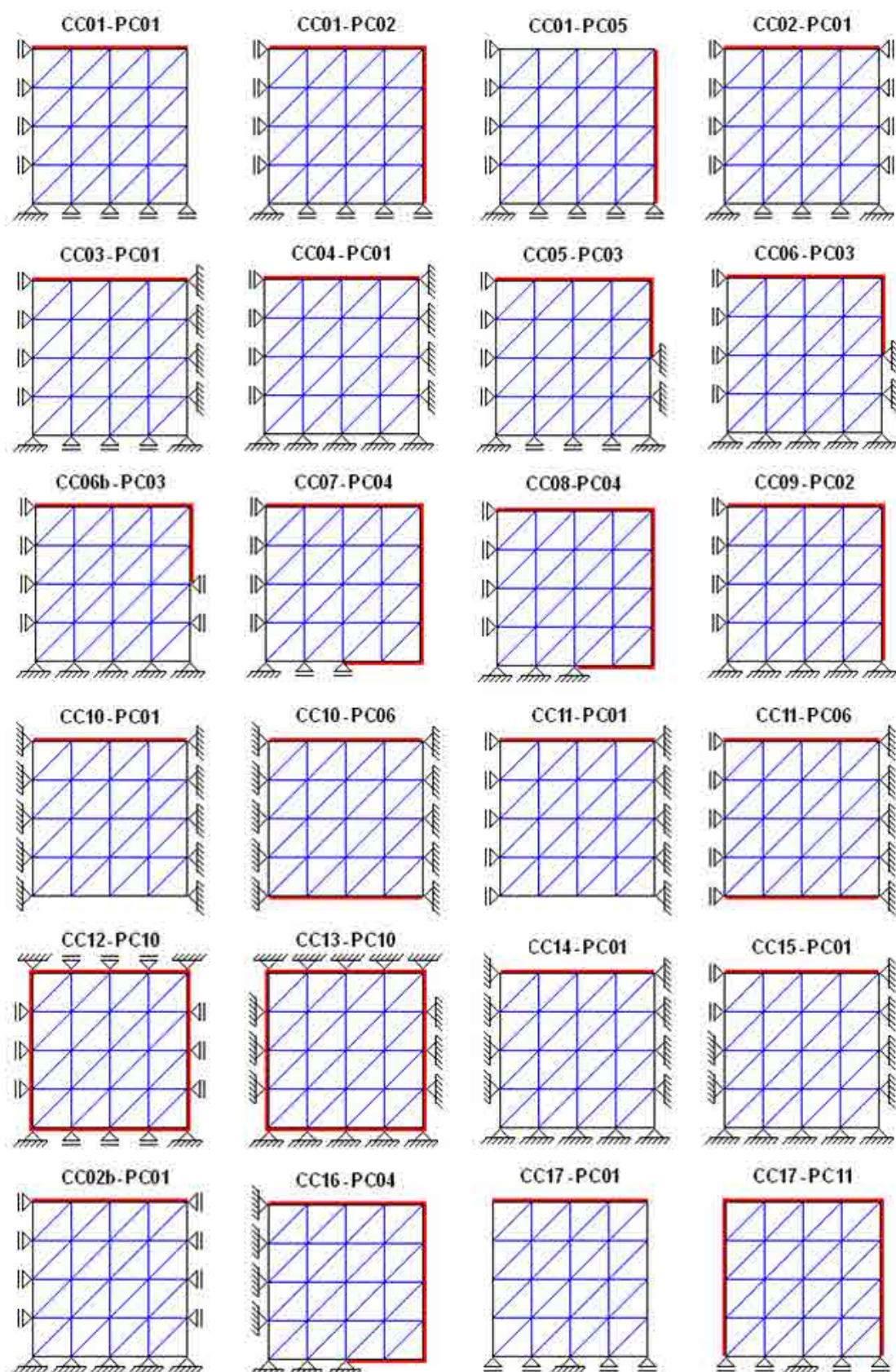


Figura 4.7 - Esquemas utilizados para analizar la influencia de las condiciones de contorno en succión y desplazamientos en el problema de desecación de suelos.

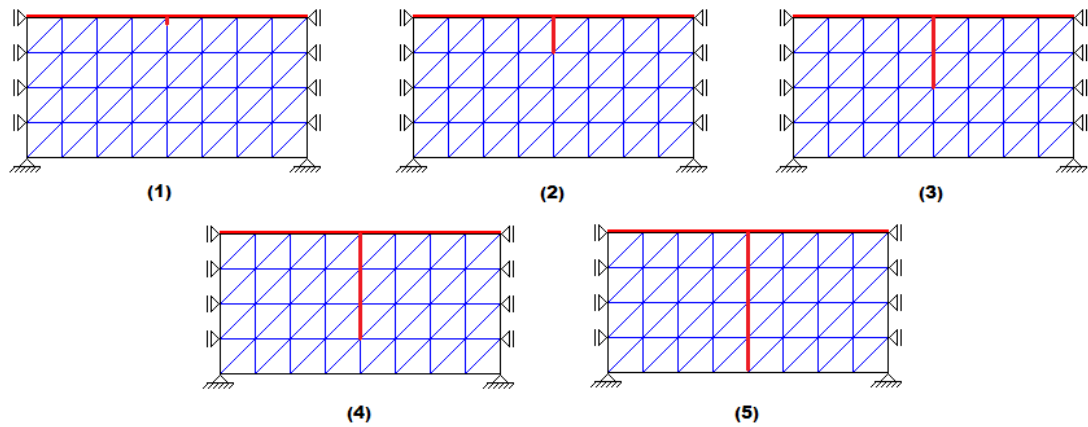


Figura 4.8 - Esquemas utilizados para analizar la influencia de grietas centrales en la desecación de suelos.

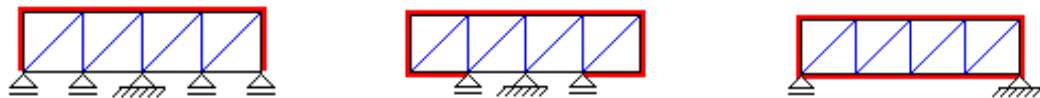


Figura 4.9 - Esquemas utilizados para analizar la influencia del arqueado en muestras sometidas a desecación.

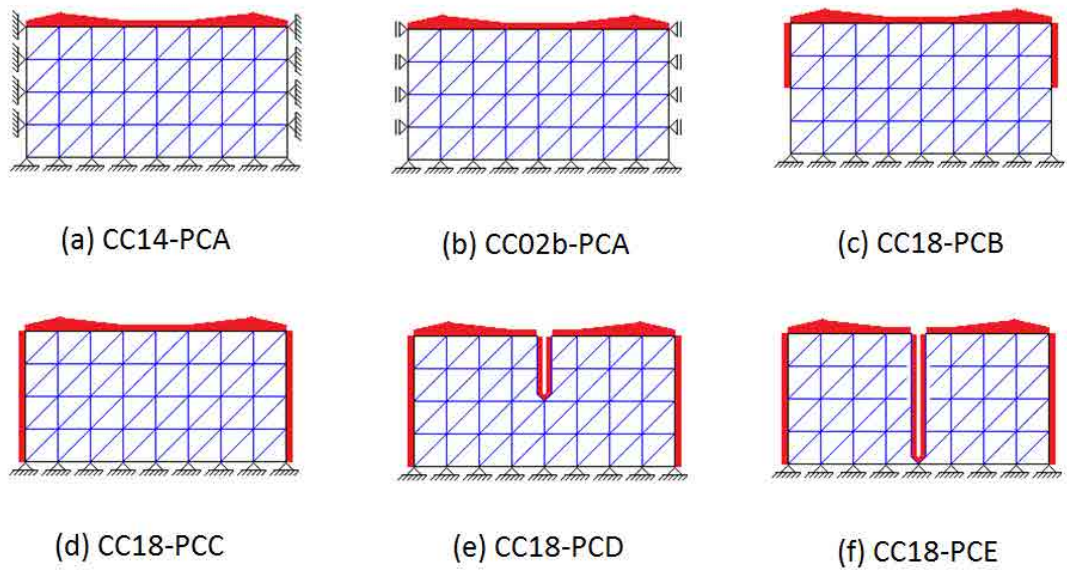


Figura 4.10 – Esquemas utilizados para analizar el caso de secado rápido

4.3.4. Técnica para el Estudio de la Formación y Propagación de Grietas

La desecación en suelos es un proceso que involucra retracción y en la gran mayoría de los casos agrietamiento. Las grietas han estado presentes en todos los ensayos realizados en esta tesis y en las tesis anteriores de esta línea de investigación (Ávila, 2004 y Lakshmikantha, 2009). Por este motivo, incorporar una técnica para el análisis de agrietamiento al modelo presentado en este Capítulo resulta de fundamental importancia.

Para estudiar una grieta es necesario contestar 3 preguntas básicas:

- ¿Cuándo y dónde comienza la grieta?
- ¿En qué dirección propaga la grieta?
- ¿Qué longitud propaga la grieta?

Estas preguntas deben ser contestadas por el modelo numérico en el contexto del MEF. Básicamente, la aparición de una grieta implica un cambio en las condiciones de contorno del problema, ya que se añaden nuevos contornos donde en este caso habrá que modificar la condiciones de contorno en desplazamientos y probablemente la condición de contorno en succión. Por lo tanto, se modifica la geometría del problema y habrá que adaptar la solución para cumplir con las ecuaciones fundamentales de equilibrio y balance del problema a medida que la grieta avance.

La propagación de la grieta se modela como una secuencia temporal de problemas de contorno con un incremento discreto de la longitud de la grieta y una separación material a lo largo de la longitud de propagación. La propagación real de las grietas en el suelo y el proceso de rotura son en realidad procesos continuos. Por ello, hay que distinguir entre el modelo material y la técnica numérica para resolver el problema.

Durante el proceso de secado, la resistencia a tracción varía desde un valor nulo cuando el suelo es un lodo fluido alcanzando un máximo en cierto momento del proceso y disminuyendo luego hasta alcanzar un cierto valor. En la Figura 4.11a, se presenta la resistencia a tracción de la arcilla de Barcelona en función del contenido de humedad (Lakshmikantha, 2009) donde se observa el comportamiento mencionado. Para responder a la pregunta de cuando y donde comienza una grieta, se utiliza un criterio de la Resistencia de Materiales Clásica. Una grieta comienza o propaga cuando se alcanza el valor de la resistencia a tracción del suelo. En la Figura 4.11b, se presenta el criterio de rotura que corresponde a un material elástico-frágil. Este

tipo de comportamiento es válido a escala ingenieril (macroscópica). Cuando se alcanza la resistencia a tracción el material no tiene capacidad resistente en absoluto y el inicio de la grieta es instantáneo. No hay zona de daño ni plasticidad asociada con la punta de la grieta. Tampoco define la longitud de propagación de la grieta. A pesar de las limitaciones de esta técnica, se implementa fácilmente en el contexto del MEF y permite una primera aproximación al problema de agrietamiento. Se ha podido medir en el laboratorio la dependencia de esta resistencia a tracción en función del contenido de humedad (Lakshmikantha, 2009) y con ello se ha establecido una función que da el valor de dicha resistencia a lo largo del proceso.

$$\sigma_t = -0.0191w^2 + 0.6874w - 2.88 \quad (4.211)$$

Donde:

σ_t : es la resistencia a tracción en KPa y w : es el contenido de humedad en %.

Otra cuestión que hay que establecer es el mecanismo de apertura de la grieta. Para ello se ha utilizado el concepto de modos de apertura de la MF. En esta tesis doctoral se considera que las fisuras se producen por apertura, modo I de fractura, por considerarlo el más importante y para simplificar el tratamiento. Una vez implementado este modo, se pueden implementar los otros o combinaciones de ellos en caso de ser necesario. Los tres modos de fractura se presentan en la Figura 4.12: Modo I de apertura, Modo II de cizallamiento y Modo III de rasgado.

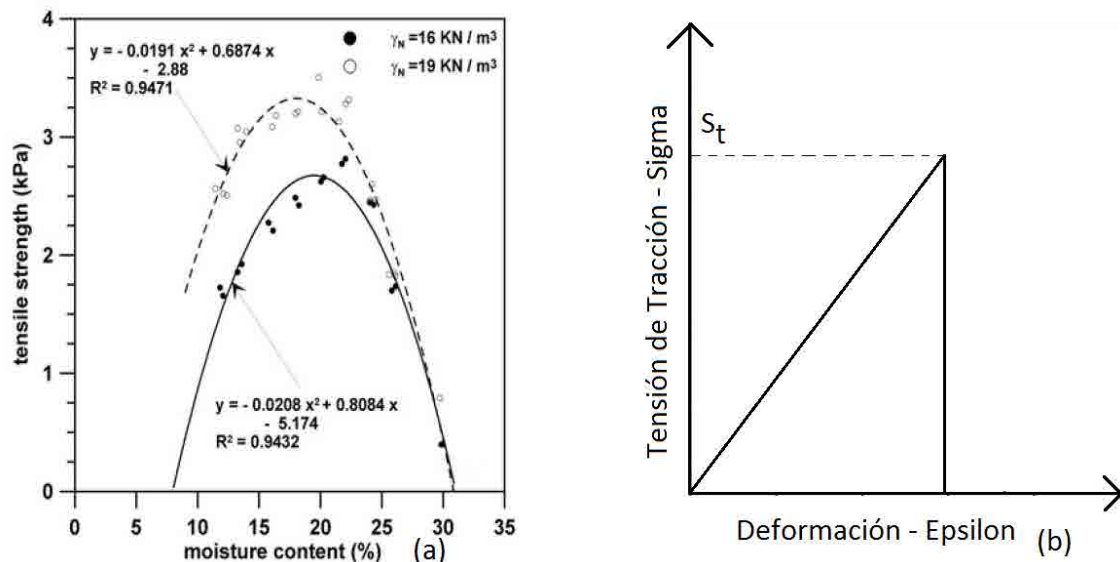


Figura 4.11 – Criterio utilizado para tratar en inicio de agrietamiento, a) Resistencia a Tracción en función del contenido de humedad (Lakshmikantha, 2009); b) Criterio de Rotura de la Resistencia de Materiales Clásica

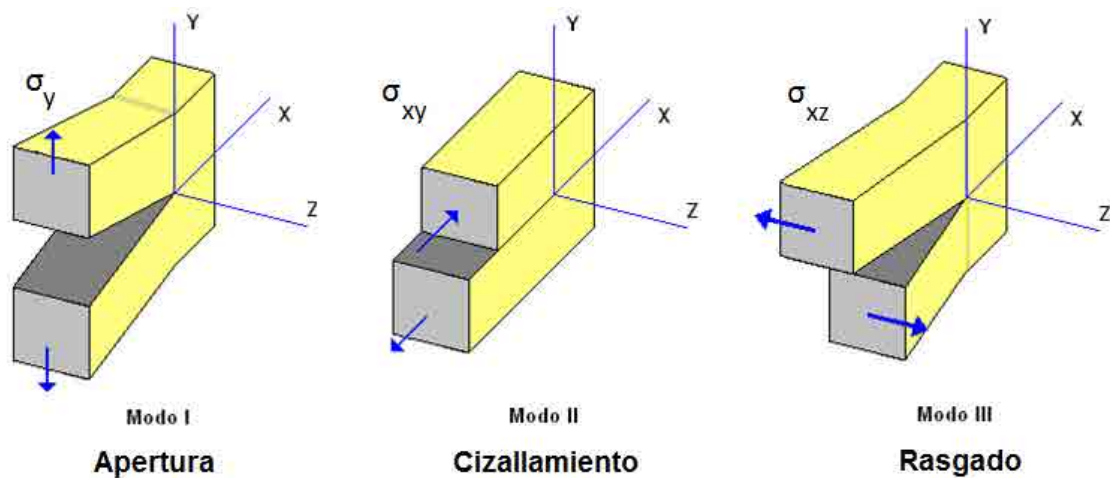


Figura 4.12 - Modos de deformación de grietas (Norma UNE 7540:1998)

4.3.4.1. Algoritmo de Liberación de Nodos

La técnica más simple para simular la propagación de una grieta en una malla de elementos finitos consiste en la desconexión de un nodo, alargando la grieta una cantidad igual a la longitud de la cara del elemento hasta el siguiente nodo. La idea se observa en la Figura 4.13a en la cual se considera el modo I de fractura (Figura 4.12). En modo I, la grieta propaga siguiendo una línea de simetría. En los contornos donde estén prescritos los desplazamientos la técnica solo necesita la liberación de dicha condición de contorno. En el caso general de una grieta en medio de la geometría, se necesita desdoblar el nodo de la punta de la grieta con lo cual se producirá la separación de las caras de los elementos adyacentes. Así, se ha de agregar un nodo a la malla, lo cual constituye una re-enumeración y se considera una técnica de remallado elemental. Se ha de actualizar las coordenadas nodales y las conectividades de los elementos. Cuando se desdobla un nodo, se eliminan fuerzas iguales y opuestas en el caso general (Figura 4.13b), o una fuerza de reacción en el caso del borde que necesitan ser re-equilibradas. Este cambio abrupto deja un estado de tensiones que no está en equilibrio y que puede causar problemas numéricos. Una forma de evitar problemas es aplicar una reducción gradual de las fuerzas nodales o reacciones. Otra forma es recalcular el problema hasta redistribuir el estado de tensiones y alcanzar el equilibrio. En este trabajo se ha utilizado la primera opción logrando resultados aceptables.

Si se asume que se ha alcanzado el criterio de propagación de la grieta, el algoritmo de liberación de nodos es el siguiente:

- Detener la ejecución del proceso y mantener constante el campo de succión que actúa sobre la geometría.
- Determinar el valor de la reacción en el nodo correspondiente al vínculo que se libera
- Liberar el vínculo eliminando esta restricción. Reemplazar en el nodo el vínculo aplicando una fuerza equivalente a la reacción calculada.
- Reducir la reacción equivalente lentamente manteniendo las caras de la grieta libre de tensiones.
- Comprobar la estabilidad de la nueva grieta: Si es inestable ($\sigma \geq \sigma_t$): volver a b).

Si es estable: avanzar un paso de tiempo.

Esta técnica es especialmente útil cuando se conoce de antemano la dirección de la propagación de la grieta tal y como es el caso de la grieta en contacto con la bandeja de suelo. En grietas en el medio de la matriz de suelo, esta técnica es dependiente de la malla adoptada. De todas formas, el modelo no pretende ser predictivo al detalle.

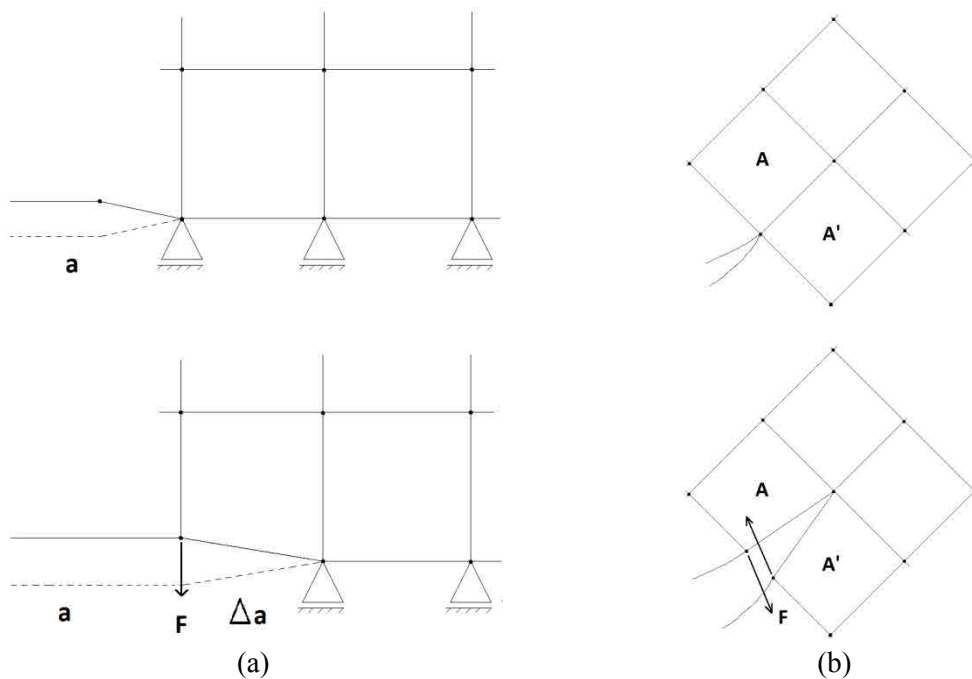


Figura 4.13 – Esquema de separación de Nodos: *a) en el contorno; b) caso general*

La dirección de la grieta en el suelo depende fuertemente de la heterogeneidad de la matriz de suelo que es en todo caso desconocida. Esta técnica es particularmente interesante cuando se usan elementos finitos estándar, lo cual requiere el cálculo de los parámetros de fractura mediante técnicas robustas (integral J) si se aplican las ecuaciones de la MF para el criterio de propagación, lo cual en este caso es innecesario al utilizar el criterio de resistencia a tracción (Griffith, 1924). La técnica permite conocer el estado de tensiones en las inmediaciones de la grieta a medida que esta progresa, lo cual es precisamente la idea del modelo propuesto. La técnica permite además calcular los parámetros de fractura (integral J, factor de intensidad de tensiones K, CTOD, etc.) midiendo la longitud de la grieta en modo I y la carga (fuerza o desplazamiento) obtenidas de la simulación, aunque esto queda fuera del alcance de la presente tesis y se deja para futuros desarrollos.

Las grietas en el contacto con las bandejas son más fáciles de implementar debido a que no se introducen nuevos nodos en la malla, sino que se modifican las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión.

4.3.4.2. Desarrollo de Grieta en el Contorno

En este caso, al programa de Elementos Finitos hidromecánico se le añade un algoritmo de remallado elemental que consiste en la eliminación de las condiciones de contorno en desplazamientos aplicada en el borde derecho al principio de la simulación cuando se alcanza la resistencia a tracción en el suelo, ecuación (4.211). Podría decirse que este valor de referencia debería ser la resistencia de adherencia entre bandeja y suelo para ser más precisos pero al no disponer de esta información se utiliza como referencia la resistencia a tracción del suelo. De todas formas, muchas veces lo que ocurre es que una delgada capa de terreno queda adherida a la bandeja y la grieta se produce paralelamente al borde de la bandeja lo que nos permite adoptar esta hipótesis como suficientemente realista. A la vez que se cambia la condición de contorno en desplazamientos cuando se alcanza la condición de resistencia, se actualiza la condición de contorno en presiones de poro de agua en el nuevo contorno creado. La dirección de propagación en este caso no se calcula ya que se supone que será vertical y hacia abajo siguiendo el borde de la bandeja contenedora.

Cada vez que se cambia la condición de contorno en desplazamientos se recalcula la distribución de tensiones hasta alcanzar el estado de nuevo equilibrio siguiendo el algoritmo presentado en la sección 4.3.4.1. En la Figura 4.14 se observa el campo de succión al final de

los 60 días de una simulación por desecación (esquema CC04-PC01) así como el campo de tensiones horizontales también a los 60 días.

En la Figura 4.15 se presentan: a) los resultados de la simulación referentes al grado de saturación, contenido de humedad y permeabilidad; b) la variación temporal de la succión; a) y b) se evalúan en el nodo de referencia blanco mostrado en la Figura 4.14a; en c) la evolución de las tensiones en nodos de referencia (Figura 4.14b) en función del tiempo. En la Figura 4.16 se presenta: a) la variación de la porosidad con el tiempo en el nodo de referencia blanco; b) los desplazamientos en función del tiempo en los tres puntos de referencia, azul, rojo y verde; en d) la relación tensión-deformación y las tensiones tangenciales considerando que las tensiones horizontales y verticales son las principales.

Como puede verse el código permite configurar un problema de desecación que incluye el agrietamiento y la propagación de una grieta lateral. A la vez que la grieta evoluciona, se pueden graficar las variables y parámetros en cualquier punto de la geometría definida.

Además, se pueden graficar los campos de succión y de tensiones en cualquier momento de la simulación. Así también, se puede obtener una animación de la evolución de los campos de succión o de tensiones a lo largo del tiempo que representa la simulación.

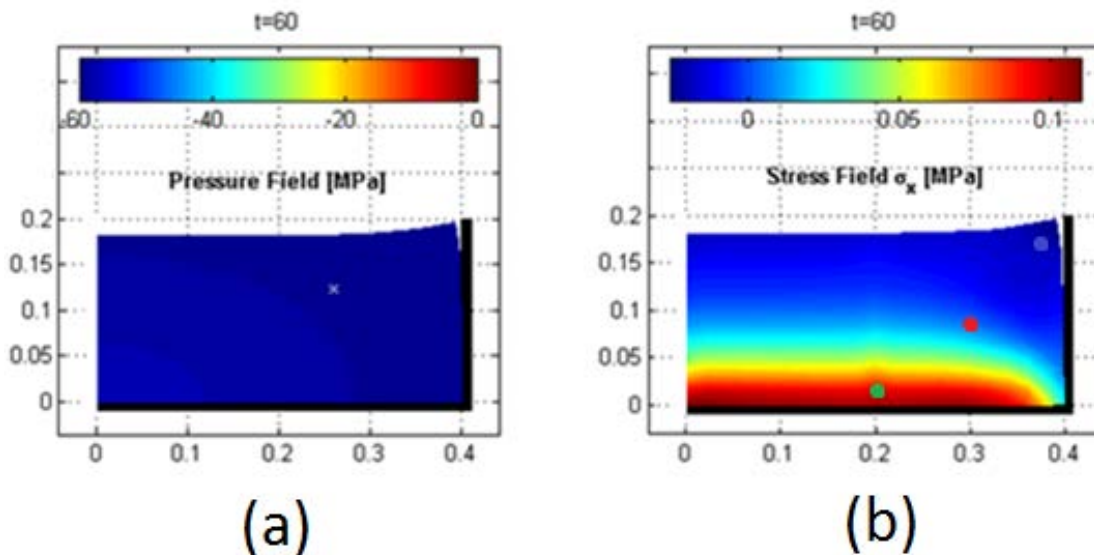


Figura 4.14 - Simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja. a) Campo de succión luego de 60 días de desecación; b) Tensión horizontal en la matriz de suelo luego de 60 días de desecación.

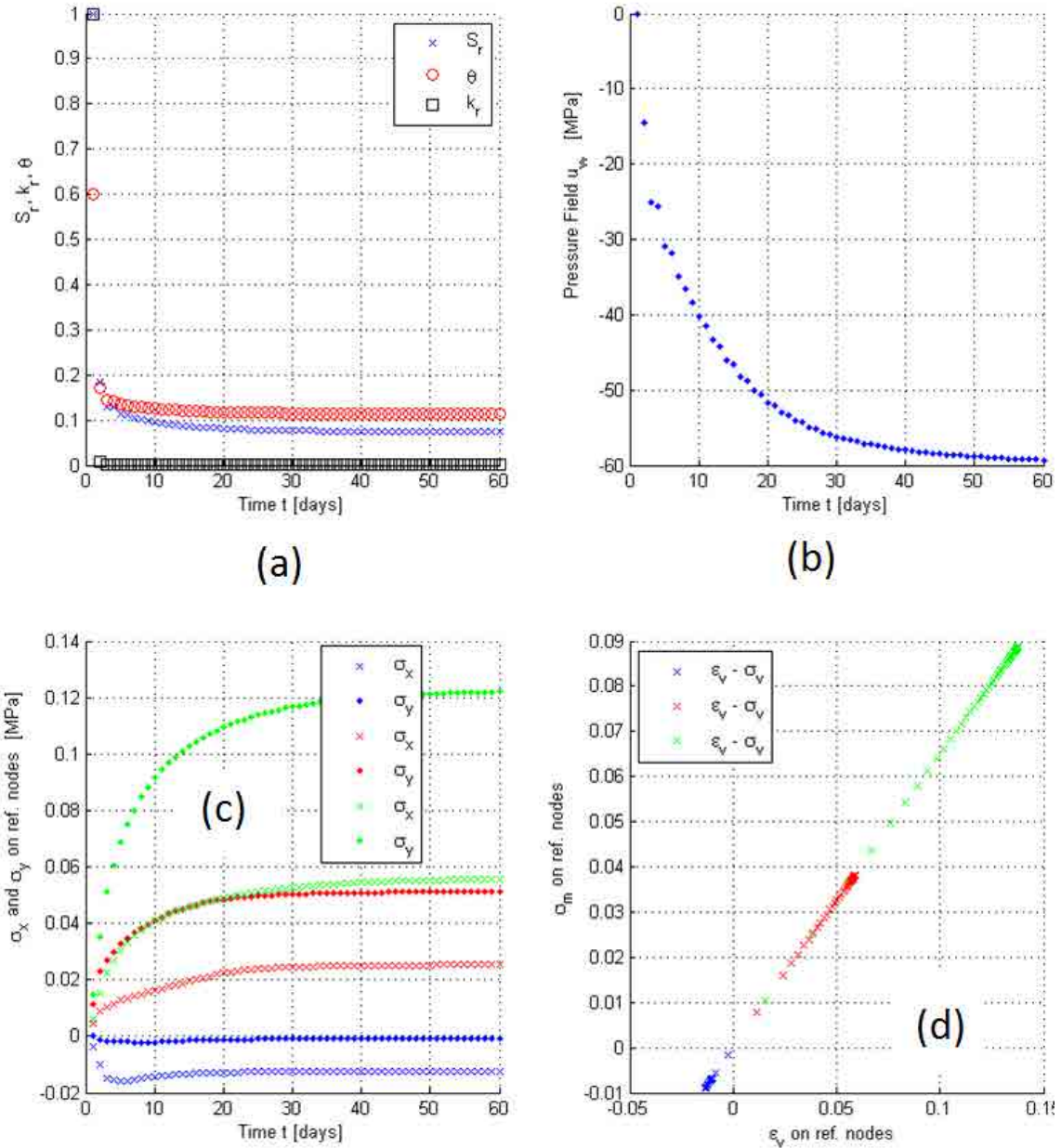


Figura 4.15 - Resultados de la simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja: a) Evolución del grado de saturación S_r , contenido volumétrico de agua θ , permeabilidad relativa k_r ; b) Evolución de la succión en el punto de referencia (cruz blanca sobre el campo de succión de la Figura 4.14a); c) Evolución de las tensiones horizontales y verticales en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde abajo de la Figura 4.14b; d) Tensión media vs deformación volumétrica en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b.

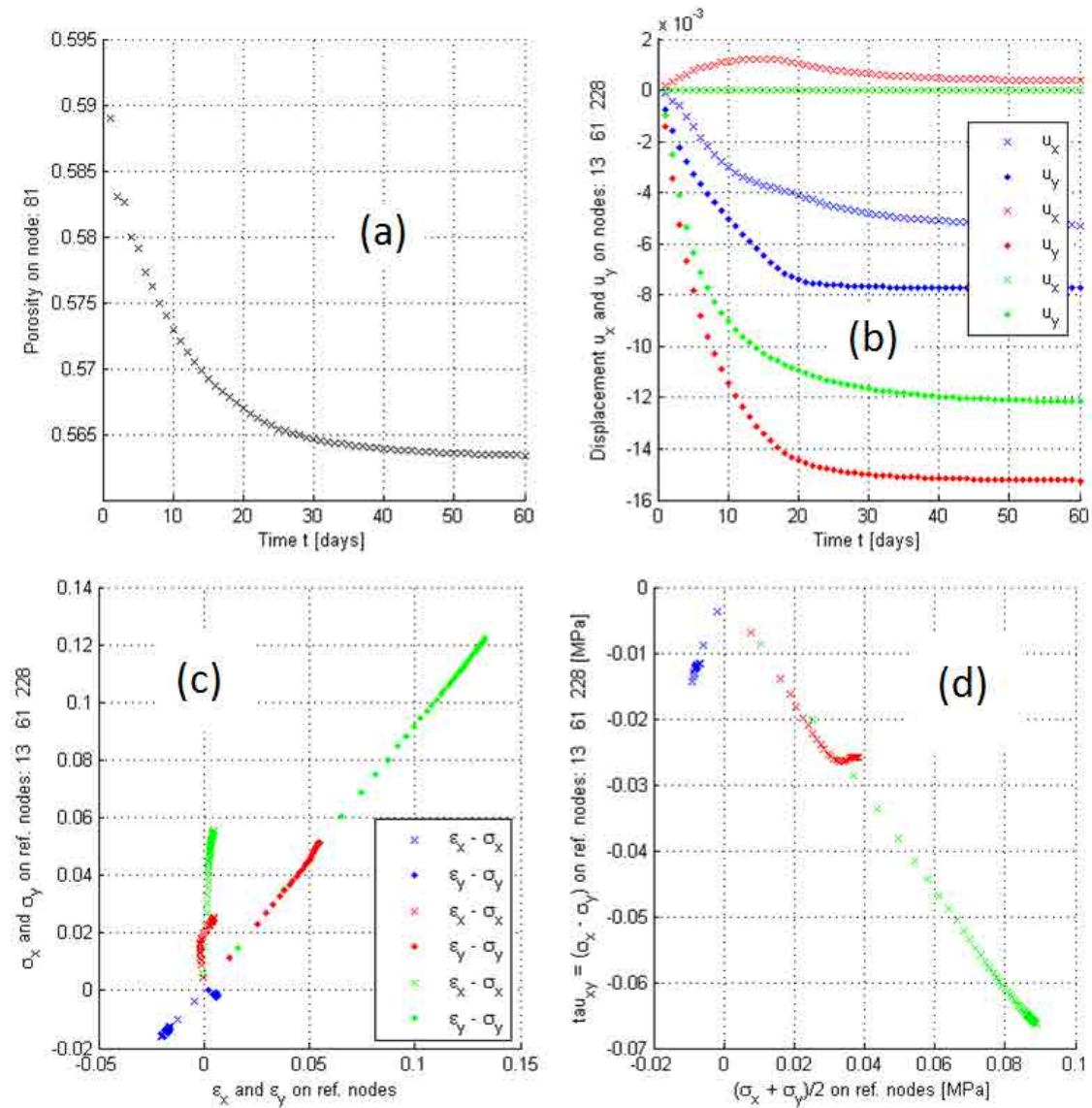


Figura 4.16 - Resultados de la simulación de la evolución de una grieta en el contacto entre suelo y la pared de la bandeja: a) Evolución de la porosidad n en el punto de referencia (cruz blanca de la Figura 4.14a); b) Evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b; c) Relación tensión-deformación en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b; d) Relación entre tensión tangencial y tensión media en los puntos de referencia: azul arriba, rojo en el centro y verde debajo de la Figura 4.14b.

4.4. Propuesta de Modelo de Mecánica de Fractura para el Inicio y Propagación de Grietas por Dsecación en Suelos

La técnica presentada en el apartado anterior tiene algunas limitaciones que pueden ser mejoradas utilizando otra disciplina, la MF. El siguiente paso natural en la investigación numérica de este problema es la implementación de la MF para la determinación del inicio y propagación de las grietas. *Se presenta una propuesta de utilización de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) Computacional al estudio del agrietamiento en suelos, dejando su implementación para trabajos futuros.*

Es evidente la necesidad de avanzar también en la vertiente experimental respecto de la determinación de los parámetros de fractura en los suelos. La dificultad en este caso es que estas propiedades varían con el contenido de humedad lo cual añade una dificultad extra en comparación con otros materiales para los cuales se utiliza la MF en los análisis de rotura (metales, hormigón, rocas, etc.). Algunos autores como (Ávila, et al., 2002) y (Lakshmikantha, 2009) han aportado técnicas y resultados respecto de los parámetros de la MF pero aún es un tema de investigación abierto.

En este apartado, se resumen los conceptos fundamentales en los que se basa la MFLE y se hacen comentarios referidos a la fractura en el problema de grietas por desecación. Se presenta la manera de tratar el inicio y propagación de la grieta cuando se trabaja con la MF.

Finalmente, se comentan los elementos fundamentales de la MF Computacional que será la que se utilice en el contexto del MEF y se presenta un diagrama de flujo que representa la visión global del futuro modelo basado en la MFLE.

4.4.1. Mecánica de Fractura Lineal Elástica

La MF busca las relaciones entre el tamaño y forma de una grieta y las fuerzas que producen la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas. Para lograr esto se basa en el conocimiento de los campos de tensiones y deformaciones alrededor de las grietas y en el balance de energía que tiene lugar durante los procesos de propagación de las mismas. La MF fija el marco para establecer un modelo constitutivo donde se tenga en cuenta la presencia de defectos en el material. Se puede clasificar según la extensión de la deformación plástica en los siguientes tres tipos (Figura 4.17):

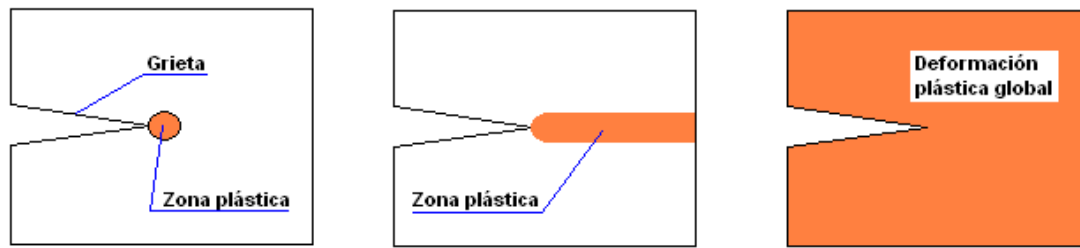


Figura 4.17 - Esquema de tipos de fractura

Fractura lineal elástica: cuando el comportamiento del material es elástico salvo en una pequeña zona en la punta de la grieta.

Fractura elasto-plástica: la zona plástica se extiende a todo lo ancho de la pieza, pero permaneciendo en una región estrecha alrededor del plano de la grieta. El resto del material del componente sigue teniendo comportamiento elástico.

Colapso plástico: la deformación plástica es generalizada en todo el componente.

Si durante la propagación de la grieta desaparecen las cargas y esta se detiene o disminuye se dice que la propagación es estable. Si la propagación es rápida e imposible de detener se dice que esta es inestable.

La MF introduce una variable adicional en el análisis de la resistencia de una estructura, que es *el tamaño de la grieta*. En el problema de grietas por desecación, interesa además, el *espaciamiento entre las mismas y por supuesto la profundidad alcanzada (tamaño de la grieta)*. Evidentemente, existe un *acoplamiento con el problema hidromecánico de flujo en medio poroso deformable*.

Así como la elasticidad sirve de base a otros modelos constitutivos más complejos como la elasto-plasticidad, elasto-viscosidad o el daño, la MFLE sirve de base a la fractura elasto-plástica y otros modelos más complejos. Por ello es necesario establecer un conocimiento sólido respecto de dicho capítulo de la MF.

Estos conceptos son aplicables solo al caso de materiales que presenten un comportamiento elástico. Desde 1960, las teorías de MF se han desarrollado teniendo en cuenta varios tipos de comportamiento no lineal (i.e. plasticidad, visco-plasticidad y visco-elasticidad) así como efectos dinámicos. No obstante la base es siempre la MFLE (o en inglés Linear Elastic Fracture Mechanics LEFM).

El primer paso que debería darse, en la aplicación de estos conceptos al problema en estudio, es la implementación de la MFLE. En posteriores trabajos quizás sea necesario y/o conveniente implementar un análisis de fractura más complejo. Esto dependerá de los resultados obtenidos con el primer modelo. Además, dependerá de los avances en el conocimiento del verdadero comportamiento del material en las inmediaciones de la punta de la grieta. A continuación, se presentan los elementos fundamentales de la MFLE y comentarios específicos respecto de las grietas por desecación en relación con la fractura.

4.4.1.1. Inicio de Agrietamiento y Propagación de la Grieta Usando la MFLE

La aplicación de la MFLE basada en tensiones requiere de los siguientes elementos:

- 1) La punta de la grieta tiene asociada un factor de intensidad de tensiones, K_I , (asumimos modo I por simplicidad, Figura 4.12) el cual puede ser medido o calculado, lo mismo que la resistencia a tracción en el caso de la aproximación usando la RM. Este parámetro, K_I , es función de la carga y de la forma de la estructura.
- 2) Una propiedad del material es su factor de intensidad crítico, K_{IC} , denominada tenacidad de fractura. Este parámetro se determina experimentalmente.
- 3) El comportamiento del material cerca de la punta de la grieta puede ser no lineal y plástico. Sin embargo, siempre y cuando dicha zona sea pequeña el criterio de avance de la grieta puede ser: $K_I = K_{IC}$.
- 4) La longitud de la grieta está controlada por la expresión anterior. La grieta se detendrá cuando se cumpla que: $K_I < K_{IC}$.

El problema con esta técnica es que es necesario partir de una grieta preexistente, y es la principal crítica que se le hace a la MFLE. Sin embargo, podría considerarse en este caso el tamaño de los granos o los poros del suelo como punto de partida, aunque no siempre será suficiente. El concepto de factor de intensidad de tensiones y de tenacidad a la fractura tiene sentido solo para ciertas relaciones entre el tamaño de la grieta y el tamaño del continuo estudiado.

En la Figura 4.18 se presenta la relación entre el factor de intensidad de tensiones y la longitud de la grieta, se observa que cuando la grieta no existe, longitud cero, el factor de intensidad de

tensiones también es cero. Para alcanzar la situación de propagación se necesita una longitud de grieta mínima A_m .

Los criterios de la RM y los de la MFLE son distintos y no se pueden combinar en general. El criterio de inicio de fractura para la RM es instantáneo, mientras que la realidad muestra que existe cierta resistencia remanente, como en el caso de las rocas Figura 4.19. Sin embargo, si se cumplen ciertos requisitos de escala, se puede combinar el criterio de inicio de agrietamiento de la RM con los criterios de propagación de la MFLE.

Por último hay que definir la dirección de propagación de la grieta asumiendo algún criterio. Para el modo I de fractura se puede asumir el criterio de la máxima tensión circunferencial, $\sigma(\theta)_{max}$, cerca de la punta de la grieta (Erdogan & Sih, 1963).

Existen varias técnicas para calcular la longitud de propagación de la grieta pero esto queda fuera del alcance de esta Tesis Doctoral.

4.4.2. Mecánica de Fractura Computacional

Cuando se habla de MF o MFLE en el contexto del MEF, se agrega el adjetivo Computacional puesto que se necesitan desarrollar estrategias y algoritmos para resolver el problema de la implementación de la metodología. En este apartado se presentan los ingredientes básicos de la MFLE Computacional aplicable al problema de grietas por desecación.

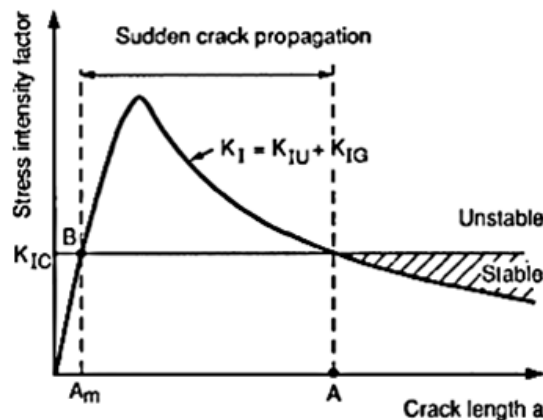


Figura 4.18 - Factor de intensidad de tensiones y propagación de grieta de acuerdo a la MFLE

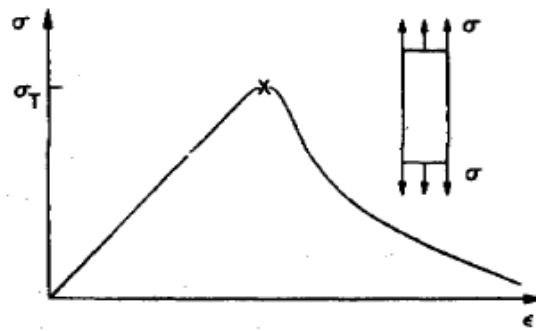


Figura 4.19 – Comportamiento de rocas sometidas a ensayos de tracción (Ingraffea, 1989)

Algunas investigaciones relativamente recientes han abordado la MFLE para estudiar fenómenos de agrietamiento de arcillas, por ejemplo (Lee & K.W. Lo, 1988); (Morris, et al., 1992); (Konrad & Ayad, 1997); (Ávila, et al., 2002).

Para resolver el problema, se debe que acoplar el problema de fractura al problema hidromecánico. Con la Mecánica de Fractura Computacional (MFC) se pretende resolver problemas como la reducción del ancho de banda del sistema de ecuaciones global, manipulación de datos entre las mallas viejas y nuevas cuando haya remallado y otras manipulaciones de datos.

Históricamente, la manera de tratar la fractura mediante el MEF fue remallando el dominio para capturar el progreso de la grieta. Alrededor de este método se han desarrollado técnicas de remallado y técnicas para trasladar la información desde la malla antigua a la nueva. Estas técnicas son complejas de implementar y consumen gran cantidad de tiempo computacional. También presentan el problema de distorsión de los elementos con lo cual se generan problemas numéricos. Otra limitación que presenta este método es que el tratamiento de grietas simultáneas se hace muy difícil.

Hace algunos años, han surgido un par de metodologías denominadas “Cohesive-zone models” para modelar la zona de agrietamiento (Borst, et al., 2004), (Oliver, et al., 2005) y (Mergheim, et al., 2005).

Una de las aproximaciones es la de discontinuidades fuertes (Continuum Strong Discontinuity Approach, CSDA), la cual utiliza distintas técnicas para predecir la propagación de la grieta: enriquecimiento nodal (X-FEM) y enriquecimiento elemental (E-FEM). El método X-FEM, introduce grados de libertad adicionales en los nodos del elemento finito. El método E-FEM introduce grados de libertad adicionales vía elemento que es intersectado por la discontinuidad.

Para implementar el X-FEM, se proponen dos técnicas. La primera se basa en un campo de desplazamientos tipo salto, que se introduce mediante una función de discontinuidad de Heaviside en la discontinuidad. El salto se activa cuando se alcanzan las condiciones de agrietamiento (Oliver, et al., 2005). Todos estos esquemas tienen mayor o menor complejidad. Sin embargo, un artículo reciente (Trabelsi, et al., 2012) propone una metodología más sencilla. La idea es permitir el inicio de la grieta sin agregar grados de libertad, pero asociando la falla con el incremento de porosidad del suelo y asumiendo que la cohesión desaparece en el elemento intersectado por la grieta. Para permitir la propagación de la grieta, se disminuye la viscosidad del elemento fracturado. Así, la deformación adicional debido a la viscosidad da una respuesta muy blanda cuando se alcanzan esas porosidades asociadas al agrietamiento. De hecho es como si los elementos desaparecieran desde el punto de vista mecánico debido a su baja resistencia. Esos elementos son tratados como elementos muy deformables. Si se quitaran de la malla habría que incorporar efectos de flujo en los nuevos contornos por lo que los autores optaron en este trabajo por conservarlos. En opinión de los autores este método está inspirado en el X-FEM.

Otra técnica que se utiliza para el tratamiento de las grietas es la de elementos junta (Garolera, et al., 2013). Esta técnica se basa en agregar elementos sin espesor en las juntas donde hay posibilidad de aparición de grietas. El comportamiento de la junta (elemento) representa el comportamiento de la grietas a través de cierta ley constitutiva.

En este contexto pueden encontrarse dos tipos de estrategias para abordar los problemas. La primera, llamada método local, describe la fractura usando modelos micro-mecánicos para representar la evolución del daño en el material. En este caso no es necesario representar en la malla la propagación de la grieta.

La segunda estrategia no representa a la grieta como una evolución del daño sino que se induce una discontinuidad del campo de desplazamiento debido a la aparición de bordes cuando una grieta se forma. En este caso se hace necesario el uso del remallado para calcular la propagación de la grieta.

4.4.2.1. Visión Global del Modelo Propuesto

La variable que se controla en el modelo propuesto es el tiempo. Así, durante el desarrollo del programa son los pasos de tiempo los que evolucionan y controlan el proceso de cálculo. El código debería estar compuesto por tres componentes básicos (recuadros en línea de puntos en la Figura 4.20). El primero consiste en el *algoritmo que resuelve el problema hidromecánico*

para suelos no saturados. El segundo componente es el *algoritmo de remallado automático* el cual modifica la topología de la malla para simular el inicio y propagación de las múltiples grietas. El tercer componente consiste en el *algoritmo para calcular el factor de intensidad de tensiones, la trayectoria de la fractura, la reducción del ancho de banda del sistema global de ecuaciones, actualización de datos de la antigua a la nueva malla y otros algoritmos de manipulación de datos*. Los pasos principales a seguir en el programa y que se muestran en el diagrama de flujo de la Figura 4.20 son esquemáticamente los siguientes:

1. Dado un incremento de tiempo se realiza el análisis hidromecánico para suelo no saturado con el cual se obtienen los campos de tensiones y deformaciones en los nodos de la malla. Con estos datos podemos predecir los puntos donde se iniciarán las primeras fisuras. Si no hay puntos donde se iniciarán fisuras se avanza un paso de tiempo.
2. Cuando en un punto de la malla se alcanza la condición de inicio de fisura, se identifica este punto y se procede a desdoblar dicho nodo en dos. En estos puntos se calculan los factores de intensidad de tensiones. Y con estos se determinan si las grietas se propagarán y en qué dirección de acuerdo al criterio de fractura en modo I.
3. Si alguna de las grietas se propaga, se extiende dicha grieta tentativamente un valor predefinido.
4. Se ejecuta el remallado en la malla del paso de tiempo anterior $i-1$, para extender la grieta en la dirección predicha.
5. Se procede a la re-enumeración de los nodos de la malla para evitar aumentar el perfil del sistema de ecuaciones global. Se trasladan los datos de la vieja malla a la nueva.
6. Se aplica un nuevo paso de tiempo.

Los pasos de 1 a 6 se repiten de manera iterativa y para cada paso de tiempo, se va perfeccionando la longitud de la grieta usando un algoritmo predictor-corrector. Este proceso continúa hasta logra convergencia, es decir, que en la actual predicción no hay diferencias significativas con la siguiente.

Una vez que se obtiene la convergencia, los datos geométricos y las variables de estado asociados al incremento i se almacenan para su uso en un paso posterior.

Se aplica un nuevo incremento temporal $i+1$ y se repite el proceso hasta completar el análisis.

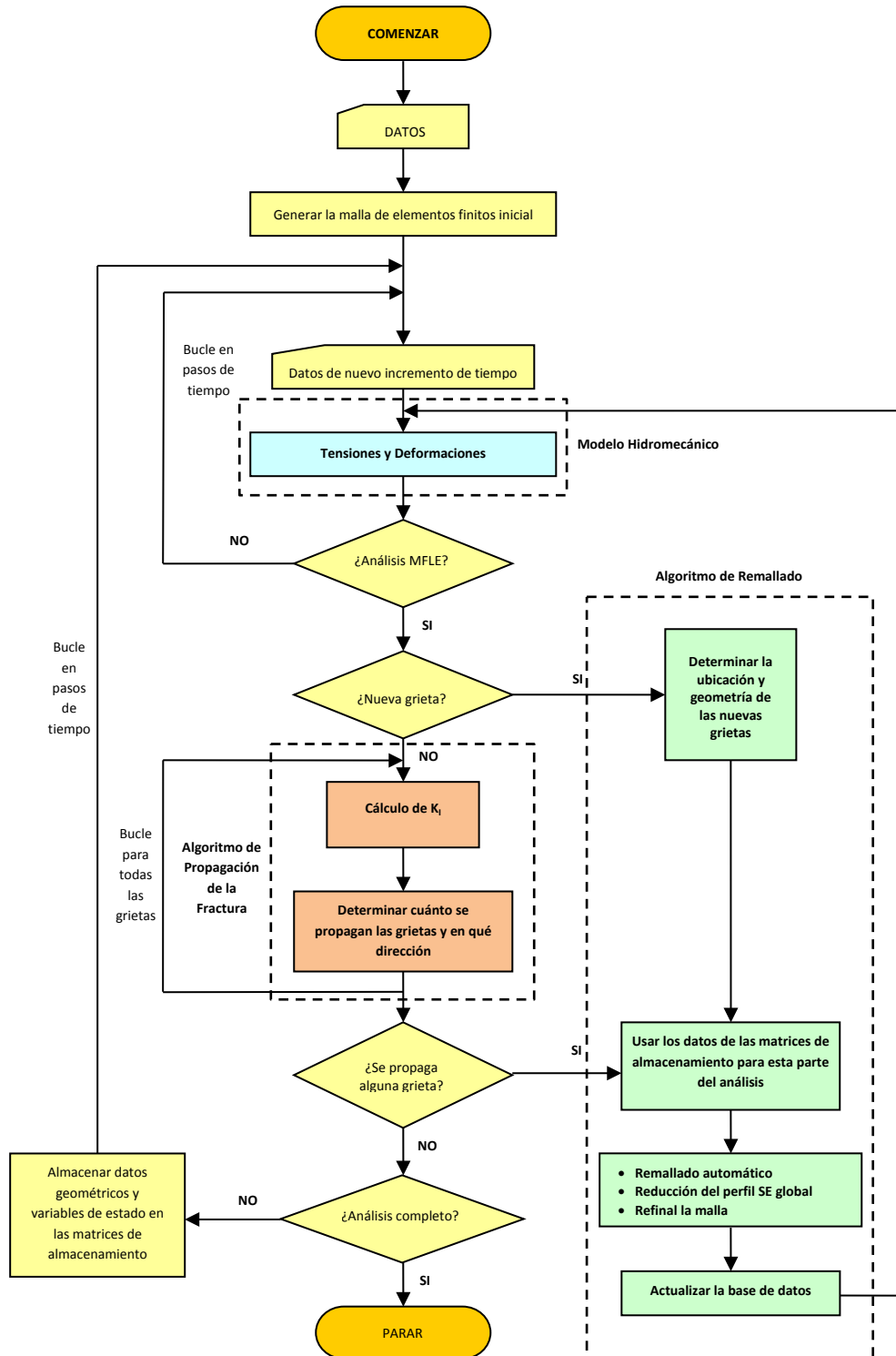


Figura 4.20 - Diagrama de flujo del modelo propuesto usando MFLE

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 4.20, se resume el modelo propuesto. En este diagrama se observa la importancia crucial del modelo hidromecánico ya que será el que proporcione los campos de tensiones en todo el dominio en cada paso de tiempo. Los criterios de la RM y de la MF permiten detectar el lugar donde se producirán las grietas y la manera en que estas se propagarán a través del medio poroso. Una vez localizado el lugar donde se producirá la fractura, las técnicas de remallado permiten refinar la malla donde sea necesario para poder calcular con exactitud los coeficientes y toda otra propiedad que permita conocer la dirección y la magnitud de la propagación de la fisura.

4.4.2.2. Remallado Automático

Una de las características fundamentales de cualquier código de elementos finitos para propagación de fractura discreta es su algoritmo de remallado. Se puede decir que existen tres estrategias de remallado descritas en la literatura. La primera involucra la *distorsión de la malla existente* a fin de adecuarla a la trayectoria de la fractura. Esta distorsión se puede alcanzar tanto a través de modificaciones despreciables en la topología de la malla como mediante técnicas de mapeo. La segunda estrategia es *remallar completamente el domino de estudio*. La ventaja de esta es que se pueden generar elementos bien formados. Sin embargo, la desventaja es que hay que transferir muchísimos datos de la vieja a la nueva malla. Esta transferencia tiende a provocar errores y es computacionalmente cara.

La tercera estrategia emplea *técnicas de remallado local* con las cuales se modifican solo una zona de la malla cercana a la punta de la grieta. Así solo se requerirá transferir algunos datos de una malla a la otra y esto disminuirá y concentrará los errores a una zona de la malla y por supuesto se reduce el esfuerzo computacional. De todas formas los elementos en las zonas de remallado pueden distorsionarse.

Esquemáticamente las operaciones de remallado pueden resumirse en las siguientes etapas:

- Criterio para decidir la necesidad de remallado
- Generación de la nueva malla
- Transferencia de información de la vieja a la nueva malla

En la Figura 4.21a se pueden observar tres zonas en las cercanías de una posible fisura, la zona que rodea a la punta de la grieta (naranja) es la zona de malla más fina y que servirá para determinar los parámetros de fractura necesarios para la determinación de la magnitud de

propagación y dirección de propagación de la grieta. La siguiente zona (amarillo) es una zona de transición, donde los elementos de la malla tienen un tamaño intermedio entre la malla global y la de la punta de la grieta. La zona (azul) es finalmente la malla de la geometría global.

Las técnicas de refinamiento de la malla en la punta de la grieta son varias, por ejemplo rodeando la punta de la grieta con una malla progresivamente más fina (Figura 4.21b).

Debido a su complejidad estas capacidades de refinamiento de malla no hay sido implementadas aún en el código presentado en esta tesis. Debido además a que en la actualidad de manejan varias técnicas alternativas al remallado no queda claro que esta sea la mejor opción en cuanto a mejora del código actual.

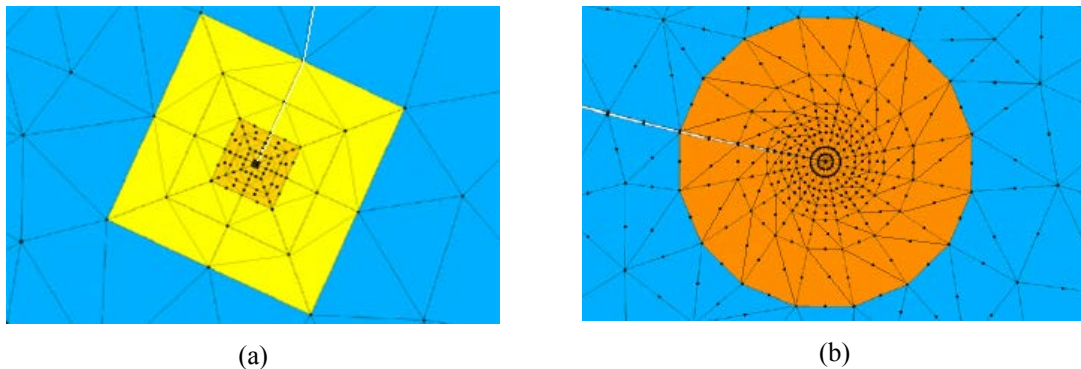


Figura 4.21 - (a) Diferenciación de tres zonas en las cercanías de una grieta; (b) Zona circular en la punta de la grieta

4.4.2.3. Trayectoria de la Fisura

La determinación de la trayectoria de la fisura es un componente esencial en los modelos de fractura discreta. El primer paso es calcular con exactitud el Factor de Intensidad de Tensiones (**Stress Intensity Factor, SIF**). Se pueden citar varias técnicas de cálculo de SIF:

- Quarter-Point Displacement Technique (QPDT),
- Nodal Displacement Correlation Technique (NDCT),
- Displacement Extrapolation Technique (DET),
- Reduced Displacement Extrapolation Technique (RDET) and
- Limited Displacement Extrapolation Technique (LDET)

Una vez calculado el factor de intensidad de tensiones, se requiere algún criterio teórico para predecir la trayectoria de la fisura. Algunos de los criterios posibles son:

- Criterio de la densidad de energía de deformación, S_{\min}
- Criterio de la máxima tasa de liberación de energía, G_{\max}
- Criterio de la máxima tensión de tracción circunferencial, $\sigma_{\theta\max}$
- Criterios empíricos

En todos estos criterios, las ecuaciones deducidas no pueden resolverse directamente sino que requieren procedimientos iterativos para encontrar el máximo o mínimo apropiado. Una vez determinada la dirección de propagación de la grieta es necesario un criterio para definir la longitud alcanzada en la propagación.

4.4.2.4. Otras técnicas para Simular la Propagación de Grietas

La técnica de partición de elementos consiste en dividir el elemento usando la trayectoria de la grieta. Es una técnica que requiere de un algoritmo de remallado y re-enumeración para crear los nuevos elementos y nodos que surgen del desdoblamiento del elemento. Es una técnica que puede simular exactamente la trayectoria de la grieta. La desventaja es la modificación de los datos del programa de elementos finitos cada vez que se debe reestructurar la malla.

La técnica de eliminación de elementos consiste en eliminar los elementos más solicitados en la zona de la punta de la grieta. Muchos programas comerciales ofrecen la posibilidad de activar la técnica de eliminación de elementos (**element death option**). Es relativamente simple de implementar pero presenta varias desventajas. Los resultados dependen del tamaño de los elementos y de la forma de la malla de elementos finitos.

La técnica de adaptación de la rigidez de los elementos es un modelo de daño que cambia la matriz de rigidez de los elementos donde se alcanza el criterio de fractura. La nueva matriz es anisótropa lo que define bandas de material que simulan el efecto de la grieta. La gran ventaja de este método es que no necesita cambiar la malla de elementos finitos. Sin embargo, es un método que presenta dependencia de la malla puesto que el ancho de la banda que simula la grieta está asociado al tamaño del elemento.

Como puede verse hay una gran cantidad de técnicas que pueden ser implementadas para el tratamiento de las fisuras. La elección depende de muchos factores y no es la finalidad de esta tesis estudiar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

"Con números se puede demostrar cualquier cosa"

Thomas Carlyle (1795-1881)

Capítulo 5

Simulaciones Numéricas

Se ha desarrollado un nuevo código que resuelve el problema de flujo en medio poroso deformable además del tratamiento de la formación y propagación de grietas en el entorno MATLAB. Se presentan los resultados de las simulaciones numéricas llevadas a cabo con el código desarrollado específicamente para la tesis y que se basa en el modelo numérico propuesto en el capítulo anterior. Se presentan resultados cualitativos y cuantitativos que han sido validados con ensayos de laboratorio disponibles en la literatura sobre el tema y con ensayos propios de esta Tesis Doctoral.

Todos los elementos que constituyen el modelo propuesto son complejos en sí mismos y su interacción añade aún más complejidad. El problema hidráulico por sí solo es un problema abierto aún en la comunidad científica, el problema hidromecánico es difícil de tratar incluso numéricamente debido a la no linealidad de los procesos y al acoplamiento. El acoplamiento con el agrietamiento añade no linealidad al problema debido a los cambios en las condiciones de contorno durante el proceso de desecación.

El código permite el análisis de problemas en dos dimensiones, definiendo la geometría, la malla de elementos finitos, las condiciones de contorno y los parámetros del modelo. Las secciones estudiadas corresponden a secciones radiales y diametrales de muestras cilíndricas y a secciones transversales de muestras prismáticas.

Se presentan en grado creciente de complejidad ejemplos de problemas de desecación, creados a partir de la experiencia en el laboratorio, para dar explicación a lo que ocurre con las variables fundamentales a lo largo del proceso. Con el código bidimensional se estudian un caso hipotético de desecación isotropa con restricciones mínimas. Se estudian en detalle los efectos de las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión, analizando diferentes esquemas que explican diversos aspectos del problema tales como el aumento de la rigidez que produce el aumento de succión en la masa de suelo a lo largo del proceso de desecación.

Con el modelo numérico presentado en esta tesis se han conseguido explicar las razones por las cuales se produce el agrietamiento en puntos de la superficie en el contorno en contacto con las bandejas, en el fondo y en la zona central de secciones radiales y diametrales de las muestras cilíndricas. Las simulaciones realizadas han puesto en evidencia la importancia que tienen las condiciones de contorno en este problema. Por otro lado, el modelo y las simulaciones permiten rediseñar los ensayos de laboratorio de manera tal que sea posible simularlos con mayor aproximación y además reduzcan la complejidad del proceso físico.

Se muestra que las grietas influyen en el comportamiento del suelo en desecación. Así, en una primera aproximación, se estudia el efecto de grietas estáticas en un medio poroso sujeto a desecación. Es decir, como afecta la geometría de una grieta que no evoluciona, al proceso de desecación de una muestra. Se analiza además lo que sucede en el contacto entre el suelo y la bandeja contenedora en situaciones hipotéticas pero basadas en la experiencia de laboratorio.

En este capítulo se hará referencia repetidamente a la resistencia a tracción del suelo que será el criterio para el inicio de la fractura y es un concepto de la Resistencia de Materiales Clásica. Se hará referencia además al Modo I de fractura que es el mecanismo de apertura que se supone válido para modelar la grieta y que es un concepto de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE). El análisis de las simulaciones busca constantemente la existencia de tensiones de tracción que son las que activan el mecanismo de fractura del modelo.

En este apartado de simulaciones, se presentan, describen y analizan varios ensayos de laboratorio, de la literatura, con el fin de comparar, dichos resultados con los obtenidos en esta tesis y posteriormente, realizar el análisis numérico de dichos ensayos. Esto es necesario debido al carácter teórico, experimental y numérico de la tesis, que obliga al análisis desde todas las vertientes al mismo tiempo. Así, se han validado ensayos de arqueo de la literatura (Nahlawi & Kodikara, 2002) y se han comparado los resultados numéricos con otros obtenidos con el programa comercial FLAC (Kodikara, et al., 2004). También se han estudiado ensayos en bandeja circular de gran tamaño secadas en laboratorio y en una cámara ambiental de la tesis de Lakshmikantha (2009). Se ha podido reproducir el proceso de retracción y agrietamiento del suelo durante la desecación. La retracción del suelo se aproxima en cantidad y tiempo a los ensayos. Las grietas producidas en los contactos con las bandejas se explican por el desarrollo de tensiones de tracción suficientes para vencer la resistencia del suelo. Se ha podido implementar no sólo el problema hidromecánico sino también un algoritmo que es capaz de propagar una grieta en el suelo.

La manera de presentar los resultados de las simulaciones, interpretando y validando resultados experimentales, define una metodología de trabajo con la nueva herramienta. Se sistematiza el uso del código realizando comparaciones válidas de distintos casos y extrayendo conclusiones de dichas comparaciones.

5.1. Presentación del Código Propuesto para el Análisis de la Desección en Suelos Arcillosos

Del estudio del Estado del Arte y la experiencia en laboratorio, presentados en los Capítulos 2 y 3 de esta Tesis, se deduce que las condiciones de contorno juegan un papel muy importante en el proceso de inicio y propagación de las grietas en suelos sometidos a desecación. El modelo matemático presentado en el Capítulo 4, se ha implementado en el entorno MATLAB y ha permitido comprender dicho papel.

En este apartado, se presentan los resultados de las simulaciones del problema hidromecánico bidimensional sobre una geometría doblemente simétrica, sin peso propio, asumiendo la condición de deformación plana. Este problema hipotético se ha diseñado, aprovechando la simplicidad dada por la simetría en cuando a condiciones de contorno en succión y en desplazamientos, para verificar el funcionamiento del código. Además, permite comprobar que las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión son determinantes en la formación de grietas por desecación. Esto es, en el caso de no haber restricciones en los contornos de la geometría, solo se producen tensiones de compresión que por las hipótesis hechas en este modelo no podrían agrietar el suelo.

El mecanismo de inicio del agrietamiento se supone que es de apertura en la dirección de la tensión principal menor (criterio de signos con tracciones negativas), cuando se alcanza el valor de la resistencia a tracción del material y corresponde al Modo I de la MFLE. Este criterio de rotura, basado en la Resistencia de Materiales Clásica, fue propuesto por Griffith (1921) y Griffith (1924). Se supone que la longitud de propagación es igual a la longitud de la cara del elemento finito. Aunque arbitrario, este es un criterio usual en Mecánica de Fractura Computacional (MFC).

5.1.1. Desección con Restricciones Mínimas

La variable fundamental del problema hidráulico durante la desecación es la succión¹⁴. Dicha succión produce cambios en el estado de tensiones del suelo y consecuentemente deformaciones. El modelo hidromecánico propuesto es capaz de resolver el problema de la evolución de la succión o presión negativa de poros de agua en el dominio en estudio y a su vez su efecto sobre el comportamiento de las tensiones en la matriz de suelo.

¹⁴ En rigor la variable en el programa es la presión negativa de agua en los poros por la hipótesis de presión atmosférica constante e igual a cero. Sin embargo, utilizaremos por simplicidad indistintamente el término succión a lo largo del capítulo. Para los detalles respecto de esta hipótesis ver Capítulo 4 Modelo Numérico.

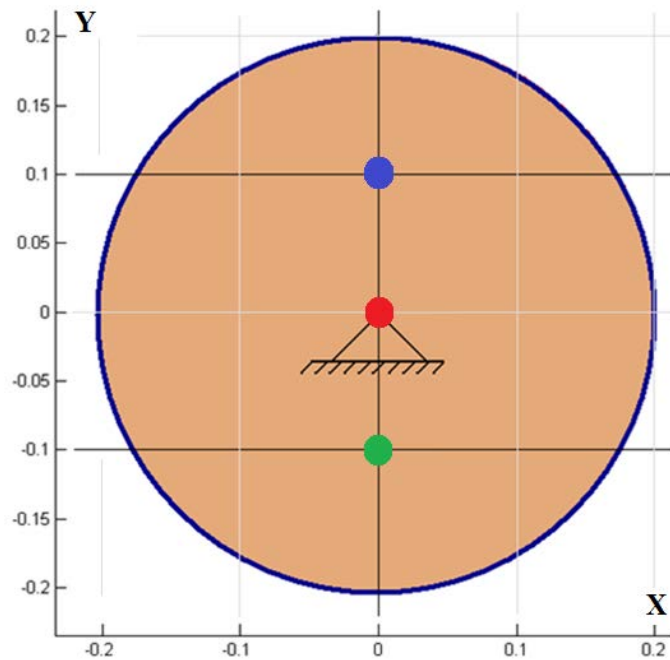
En ingeniería es usual estudiar sólo una porción del problema valiéndose de las simetrías existentes para reducir un problema tridimensional a un problema plano más simple de resolver. A la hora de estudiar la desecación tal y como se aborda en este trabajo hay que tener en cuenta que las simetrías se corresponden con la imposición de succión en el contorno, la imposición de desplazamientos restringidos, además de la forma de la muestra. La inclusión de una grieta hace que las simetrías desaparezcan, puesto que casi siempre las grietas no son simétricas y producen un cambio en la geometría del suelo.

Se presenta un caso hipotético ideal y simplificado de un cilindro de longitud infinita y 40 cm de diámetro sin peso propio sobre el cual se impone una presión de poros constante en su contorno curvo.

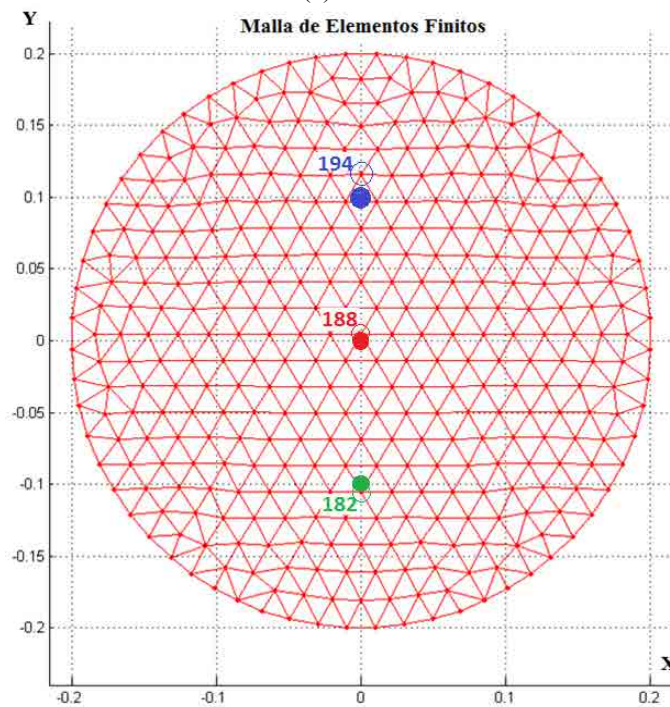
En la Figura 5.1 se presenta el esquema de la simulación bidimensional en deformación plana donde se muestra el contorno donde se impone la succión de 30 MPa (circunferencia azul) durante 10 días, la restricción de los desplazamientos en el punto central (apoyo fijo), que coincide con el origen de coordenadas, y los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde) donde se analizan algunas de las variables del modelo. La condición inicial es de succión nula en toda la geometría, lo cual equivale a que el medio está saturado al inicio de la simulación. En esta figura, se muestra además la malla de elementos finitos utilizada compuesta de elementos triangulares sobre la cual se definen tres nodos de referencia que corresponden según la numeración del mallador a los nodos 194, 188 y 182, (azul, rojo y verde respectivamente) y que son los nodos más cercanos a los puntos de referencia previamente definidos y que se encuentran sobre la línea que recorre el diámetro vertical de la sección.

Este ejercicio resulta interesante porque reduce la complejidad del problema de desecación estableciendo unas condiciones de contorno de simetría axial respecto de un eje perpendicular al dibujo y que coincide con el centro de la sección circular. Por otro lado, permite comprender como evoluciona la desecación en un caso que si bien es bidimensional tiene total correlación con un planteo unidimensional (cada radio de la sección circular es un problema de desecación unidimensional) relativamente más conocido (Rodríguez, et al., 2007).

En la Figura 5.2 se muestra la evolución de la succión y la deformación en la simulación de desecación para 0, 1, 2 y 4 días. A la vez que la muestra se seca, se retrae hasta alcanzar un estado de equilibrio. Dicho equilibrio indica que ya no hay pérdida de humedad ni se modifican los valores de las tensiones en la matriz de suelo, es decir, las variables del modelo alcanzan unos valores asintóticos.

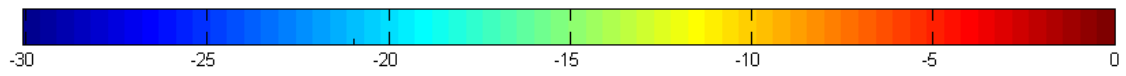


(a)

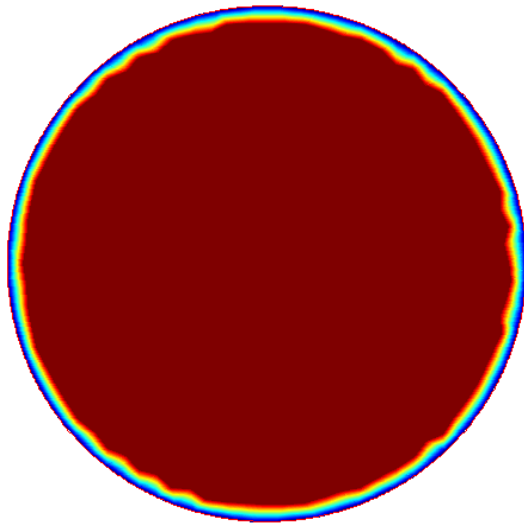


(b)

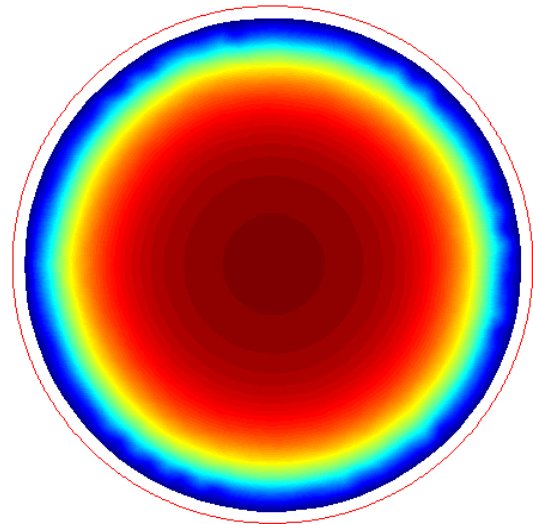
Figura 5.1 – Dsecación con restricciones mínimas. a) Esquema del problema considerando deformación plana: desplazamientos fijos en el centro de la sección, succión de 30 MPa aplicada en todo el contorno; b) Malla de elementos finitos. Se observa que los nodos no corresponden exactamente con los puntos de referencia elegidos para el análisis. Dimensiones de los ejes en metros.



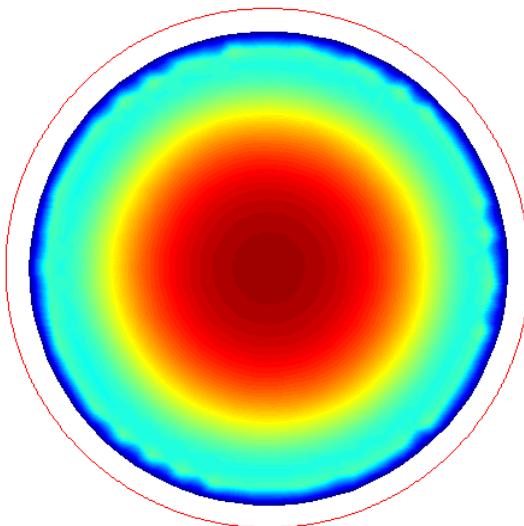
Escala de succión en MPa



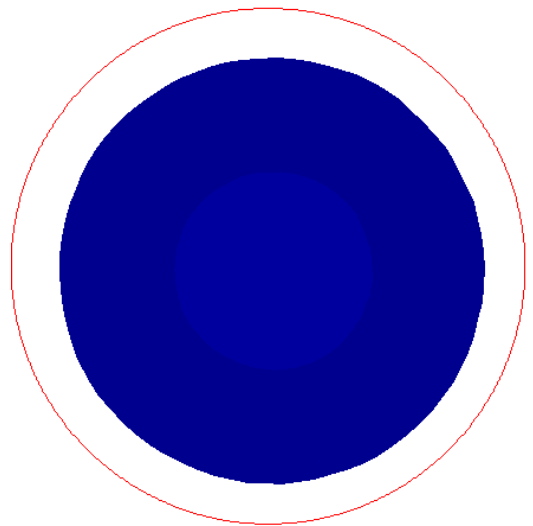
(a) Campo de succión en MPa para $t = 0$ días



(b) Campo de succión en MPa para $t = 1$ días



(c) Campo de succión en MPa para $t = 2$ días



(d) Campo de succión en MPa para $t = 4$ días

Figura 5.2 - Evolución de la succión durante el proceso de desecación en un cilindro de suelo considerando deformación plana. (La circunferencia roja exterior indica la dimensión original de la sección circular)

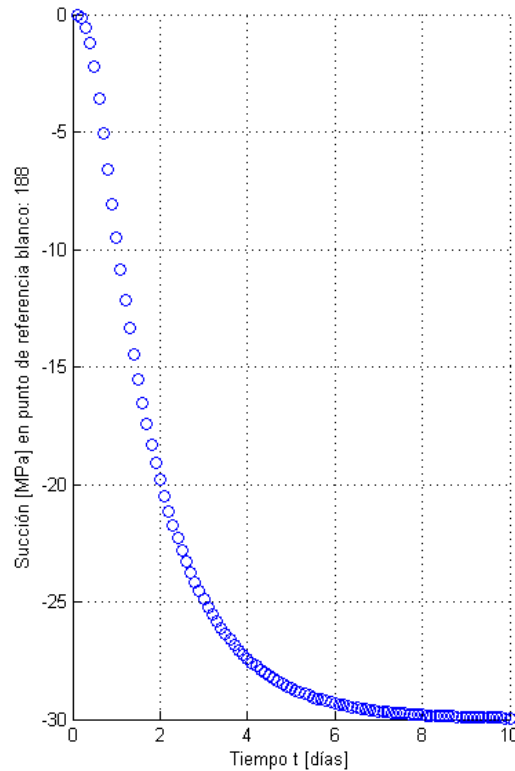


Figura 5.3 – Evolución de la succión con el tiempo en el centro de la sección circular.

Las condiciones de contorno y las simetrías generan, debido a los gradientes radiales de presiones negativas de poros, tensiones de compresión como se comprobará posteriormente. Cada anillo concéntrico de la geometría tiene tensiones circunferenciales y radiales de igual valor que varían en función del tiempo. La tensión circunferencial es igual a la tensión horizontal en los puntos analizados y es la tensión principal mayor. La tensión radial coincide con la tensión vertical en dichos puntos y es la tensión principal menor

Según estos resultados no parece ser posible detectar estados de tensión que produzcan agrietamiento¹⁵ en este problema ideal. Sin embargo, el suelo no es un medio homogéneo y los perfiles de presión de poro o succión tampoco lo serán en general. De todas formas, como se verá más adelante, este modelo hidromecánico sujeto a condiciones adecuadas de contorno predice agrietamiento para las hipótesis de rotura adoptadas.

En la Figura 5.3, se observa la evolución de la succión, la cual se comporta de la manera esperada, tal como evoluciona en el laboratorio (ver Figura 5.43). La succión aumenta lentamente al

¹⁵ Se considera que tensiones de tracción implican posibilidad de agrietamiento. Esto corresponde al criterio de Resistencia de Materiales adoptado cuando se alcance el valor de resistencia a tracción del suelo. El mecanismo de agrietamiento es el Modo I de fractura. Sin embargo, tensiones tangenciales que se corresponden con el modo II o III de fractura podrían también generar grietas.

principio, luego rápidamente y más lentamente al final del ensayo hasta alcanzar un valor asintótico el cual indica que se ha alcanzado un estado de equilibrio con el ambiente.

En las Figura 5.4 y Figura 5.5 se observan la evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo, la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica, la relación tensión-deformación horizontal y vertical, y la evolución de los desplazamientos en los tres nodos de referencia, mencionados arriba, de la malla de elementos finitos adoptada. Las tensiones se incrementan rápidamente al principio y luego más lentamente hasta alcanzar valores asintóticos que corresponden con el estado de equilibrio que se alcanza al final del ensayo de desecación o más precisamente de la simulación de dicho ensayo.

En el nodo central, que está prácticamente en el centro de la sección circular, las tensiones horizontales y verticales son aproximadamente iguales debido a la simetría del esquema definido. En los otros dos puntos donde se analizan las tensiones (nodos 182 y 194) existen pequeñas diferencias entre las tensiones horizontales y verticales de uno y otro, puesto que solo son aproximadamente simétricos (Figura 5.1b), debido a que se eligen nodos de la malla para el análisis y no puntos en la geometría. Además, debido a que el método de elementos finitos solo es aproximado y se trabaja con elementos cuyas funciones de forma son lineales, las tensiones y las deformaciones presentan valores constantes en cada elemento. El valor de la tensión en el nodo analizado será el promedio de las tensiones calculadas en los elementos que están en contacto con dicho nodo.

La diferencia entre tensiones horizontales y verticales en cada uno de estos puntos es debido a la posición relativa respecto del centro del círculo. Las diferencias entre tensiones horizontales y verticales en un punto varían a lo largo del radio del círculo definiendo un cierto perfil de tensiones, con valores máximos en el centro de la sección circular y reduciéndose hacia los bordes hasta anularse en el contorno.

La relación entre la tensión media y la deformación volumétrica es prácticamente lineal (Figura 5.4b) debido al modelo constitutivo adoptado, basado en superficies de estado, y que es adecuado cuando las deformaciones volumétricas son preponderantes frente a las deformaciones por corte que suponemos muy pequeñas o nulas en el caso de la desecación en suelos.

La relación tensión-deformación (Figura 5.5a) es no lineal como se ha formulado y se observa en el laboratorio. Debido a que el origen de coordenadas coincide con el centro de la sección circular del esquema en estudio, los desplazamientos en extremos verticales opuestos presentan valores aproximadamente iguales y opuestos (Figura 5.5b). Nuevamente, las diferencias son debido a que los puntos no son exactamente simétricos (Figura 5.1b), porque son nodos de la malla de elementos finitos y no de la geometría, y la aproximación por MEF no es exacta.

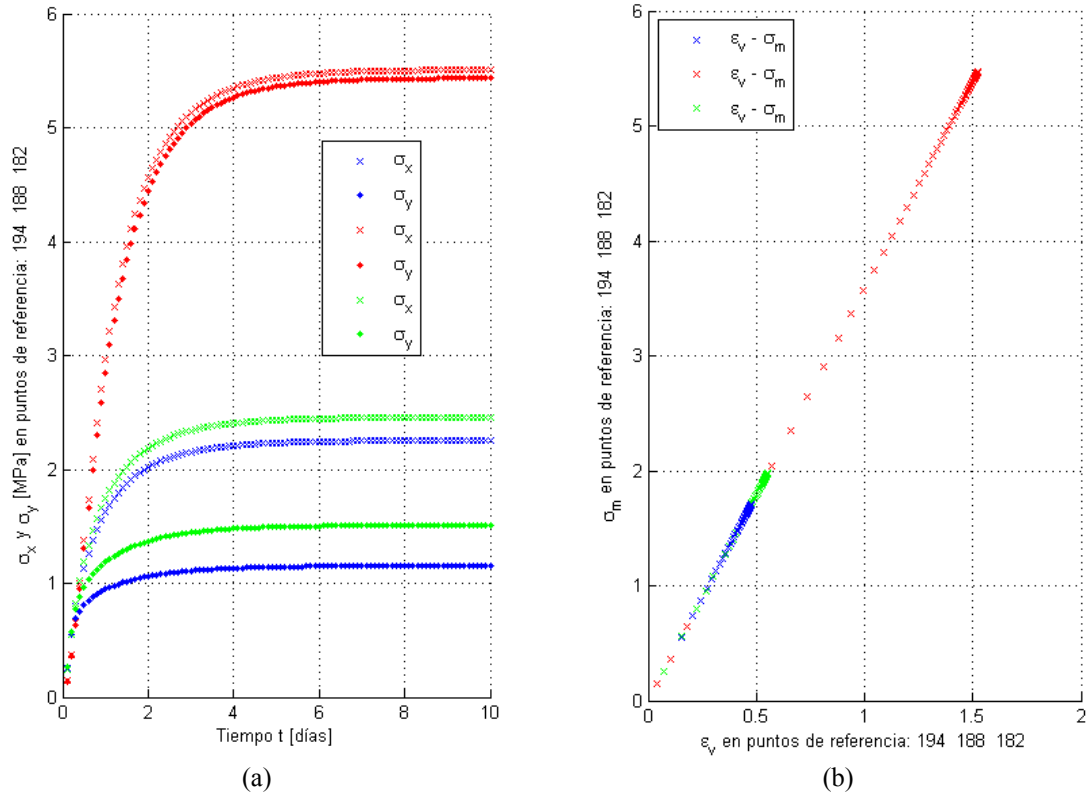


Figura 5.4 – Desecación con restricciones mínimas: (a) Tensiones normales (MPa) en función del tiempo; (b) tensión neta media (MPa) en función de la deformación volumétrica.

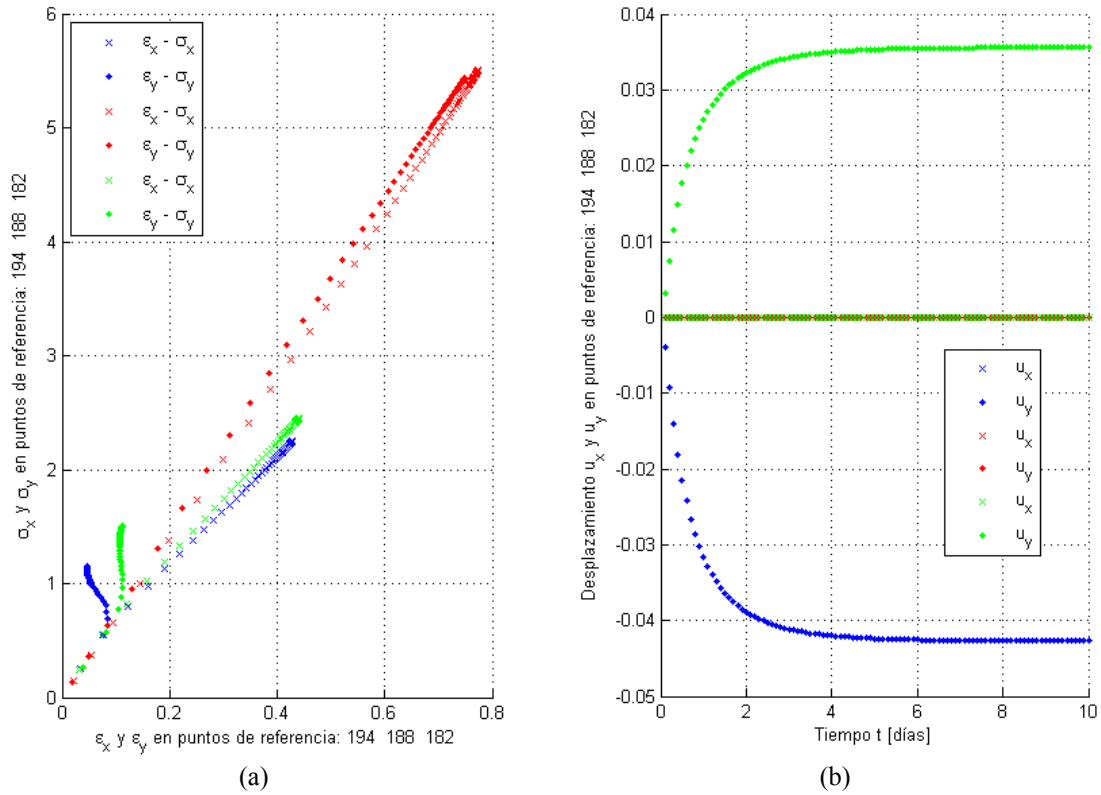


Figura 5.5 – Desecación con restricciones mínimas: (a) Relación tensión (MPa)-deformación en los nodos de referencia; (b) desplazamientos (m) en los nodos de referencia en función del tiempo.

Además, de las curvas presentadas en la Figura 5.5, el programa permite realizar un post-proceso de los campos de succión, las tensiones horizontales y verticales y cualquier otro campo escalar que se quiera analizar (porosidad, grado de saturación, parámetros escalares del modelo, etc.). En la Figura 5.6, se muestran los resultados de la simulación a 5 días de secado de un total de 10 días. Puede observarse que las tensiones en el contorno son nulas y la distribución de tensiones es la esperada, teniendo en cuenta la ecuación constitutiva mecánica adoptada.

En la Tabla 5.1, se presentan los parámetros utilizados para realizar esta simulación: a_1, a_2, a_3, a_4 y P_{ref} son parámetros de la superficie de estado y definen la rigidez de la matriz del suelo fijando los valores de los módulos volumétricos K y K_s (ver Capítulo 4 Modelo Numérico). El módulo de Poisson se supone constante e igual a 0.3 y el módulo de corte G es función del módulo volumétrico K . En la tabla, se presentan además los parámetros de la curva de retención (λ , es un parámetro del material y P_0 , es el valor de entrada de aire para la porosidad n_0 inicial) y los parámetros hidráulicos (k_0 , es la permeabilidad de referencia inicial para la porosidad de referencia inicial n_0 ; b es un parámetro para tener en cuenta la influencia de la porosidad en la conductividad hidráulica k_{sat} y r , es la potencia de la ley potencial que relaciona el grado de saturación con la permeabilidad relativa k_r).

No se discuten aquí las aproximaciones cuantitativas con respecto a los resultados obtenidos en laboratorio ya que en esta etapa solo se describen las posibilidades del modelo y se hacen las comparaciones necesarias para asegurar la lógica y la consistencia de los resultados preliminares de manera cualitativa. Sin embargo, se observa que los resultados están en los órdenes de magnitud esperados, tanto en lo referente a parámetros del modelo, como de succión, deformación y tensiones, teniendo en cuenta los resultados experimentales y la ecuación constitutiva adoptada.

Este ejemplo constituye un caso hipotético de desecación libre y sin restricciones. Con este ejercicio parece evidente que es necesaria la presencia de algún tipo de restricciones para producir un estado de tensiones que induzca al agrietamiento. A partir de aquí, se analizan las tensiones horizontales y verticales derivadas de la desecación bajo distintas condiciones de contorno, para comprobar si hay tensiones de tracción que puedan producir rotura cuando se alcanza la resistencia a tracción. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que el suelo no es homogéneo y el estado de tensiones producido por la desecación no será exactamente como lo predice este modelo continuo. Por lo tanto podrán producirse tensiones que pueden llegar a producir agrietamiento en la masa de suelo de este caso hipotético. Una vez producida la primera grieta, el medio pierde simetría y el problema de tensiones será muy complejo y presentará concentraciones de tensiones en las puntas de las grietas o defectos. El efecto de las grietas en el campo de tensiones se estudia en apartados posteriores.

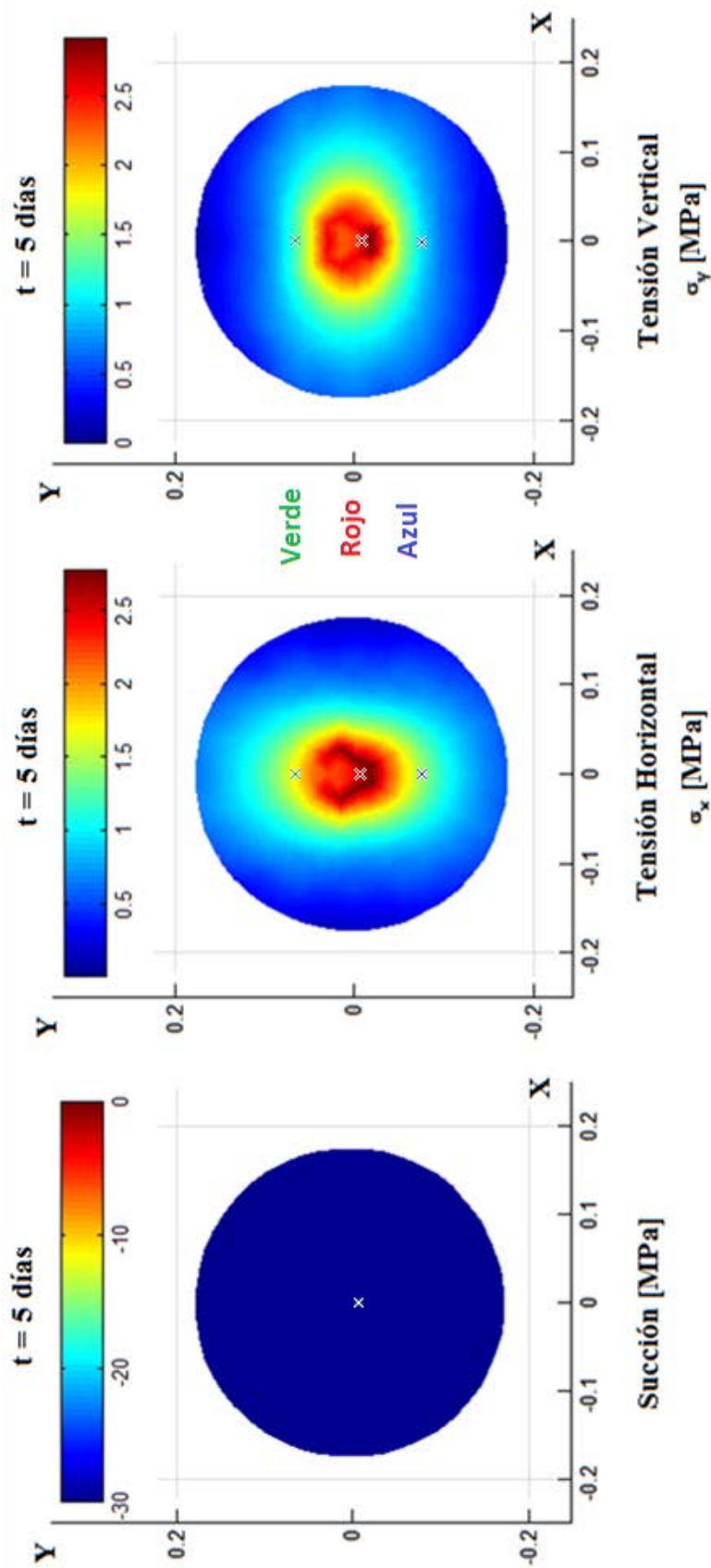


Figura 5.6 – Simulación de cilindro de suelo después de 5 días de secado. Campo de Succión en MPa, Tensiones Horizontales y Tensiones Verticales en MPa. Dimensiones de los ejes en metros.

Tabla 5.1 – Parámetros utilizados para la simulación de desecación con restricciones mínimas

PARÁMETROS DEL MODELO						
Parámetros mecánicos						
a_1	a_2	a_3	a_4 (MPa)	P_{ref} (MPa)	ν	G
-0.02	-0.0025	-0.000041	0.025	0.1	0.3	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$
Parámetros de la curva de retención				<div>Ecuación de Van Genuchten:</div> $S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]$		
P_0 (MPa)	λ	n_0				
1.05	0.39	0.6				
Parámetros hidráulicos				<div>Conductividad Hidráulica:</div> $k_{sat} = k_0 \exp[b(n - n_0)]$		<div>Permeabilidad Relativa: $k_r = (S_r)^r$</div>
k_0 (m/s)	b	n_0	r			
2.22×10^{-9}	25	0.6	3			

5.2. Efecto de las Condiciones de Contorno sobre Desplazamientos y Succión en la Retracción por Secado

Las condiciones de contorno impuestas sobre desplazamientos y succión durante el proceso de secado van cambiando a medida que aparecen las grietas. Por este motivo, resulta de interés poder estudiar y comprender la influencia de dichas condiciones de contorno en el comportamiento general de la muestra sujeta a desecación. Las condiciones de contorno en desplazamientos vienen dadas por la adherencia que existe entre la bandeja contenedora y el suelo. Esta adherencia varía a lo largo del proceso y no ha sido cuantificada en el laboratorio. Estas condiciones de contorno dependen además de la variación de la resistencia a tracción del suelo puesto que muchas veces la grieta que se produce en el contorno en contacto con la bandeja se propaga a través de la masa de suelo siguiendo un camino paralelo al contorno demarcado por la bandeja.

El proceso de agrietamiento es un proceso tridimensional como se ha podido comprobar con los ensayos hechos en el laboratorio, tanto en muestras de gran tamaño como muestras delgadas. Las grietas avanzan de forma aparentemente aleatoria en todas direcciones. Sin embargo, en el laboratorio se ha podido comprobar que las muestras se agrietan muchas veces desde la superficie superior, en contacto con el ambiente, y hacia abajo en el borde de las muestras cilíndricas, pero también desde abajo hacia arriba o incluso desde algún punto interior a la masa de suelo. En este apartado, se discuten las condiciones de contorno que provocan tracciones y que pueden producir el inicio del agrietamiento desde tres puntos distintos, en una sección radial de una muestra circular (Figura 5.7): desde la esquina superior derecha de la sección y hacia abajo, desde la esquina inferior derecha de la sección y hacia arriba o desde la esquina superior iz-

quierda y hacia abajo. Teniendo en cuenta un criterio de resistencia a tracción basado en la Resistencia de Materiales y que dependerá del grado de saturación y de la succión que presenta el suelo en el momento de la rotura.

Para ser sistemáticos y analizar las variantes posibles, se han establecido diferentes esquemas que resultan interesantes de estudiar porque demuestran la naturaleza determinista del inicio del agrietamiento, y porque corresponden a una sección radial de una bandeja cilíndrica como la mostrada en la Figura 5.7. El análisis de la sección radial, permite estudiar el contacto con las paredes y con el fondo de las bandejas contenedoras y el suelo. Además, como se ve en apartados posteriores, permite analizar la influencia de las grietas en el suelo. Se ha adoptado por simplicidad el estado de deformación plana, lo cual se justifica al suponer que las deformaciones perpendiculares a dicha sección (deformación circunferencial) serán nulas por simetría, sobre todo mientras no se formen grietas. Estas opciones surgen de la experiencia en el laboratorio y permiten comprender tanto el funcionamiento del modelo numérico como las características principales del proceso físico en el laboratorio.

Se analizan los resultados de los esquemas que se muestran en la Figura 5.8. En estos esquemas la línea roja en los contornos indica donde se impone la succión cuyo valor se mantiene constante, a menos que se indique explícitamente lo contrario. Las condiciones de contorno en desplazamientos se simbolizan con los vínculos móviles y fijos tradicionales de la Estática y la Resistencia de Materiales.

Las simulaciones de secado abarcan un período de 40 días, con un valor impuesto de succión de 60 MPa (ambos valores del mismo orden de magnitud que el alcanzado en ensayos de laboratorio de Lakshmikantha, 2009). Los esquemas analizados permiten explicar las razones de que el agrietamiento comience desde la superficie o el fondo de la masa de suelo, teniendo en cuenta las variaciones de rigidez en función de la succión y las condiciones de contorno en desplazamientos.

Las secciones radiales (Figura 5.7) que se analizan tienen una dimensión de 20×20 cm. Se considera simetría respecto de un eje vertical en el centro de la sección circular de la muestra cilíndrica. En las figuras de resultados se indica el eje de simetría y el contorno original, en rojo, de la sección radial analizada. Se definen tres puntos de referencia, que se utilizarán en todo este apartado, y son el punto azul (arriba a la derecha), el punto rojo en el centro y el punto verde (abajo a la izquierda) sobre la sección radial de la Figura 5.7.

Hay que decir además que estas condiciones son cambiantes a lo largo del proceso una vez se tengan en cuenta las grietas, tanto en su fase de iniciación como de propagación lo cual se tiene en cuenta en apartados posteriores.

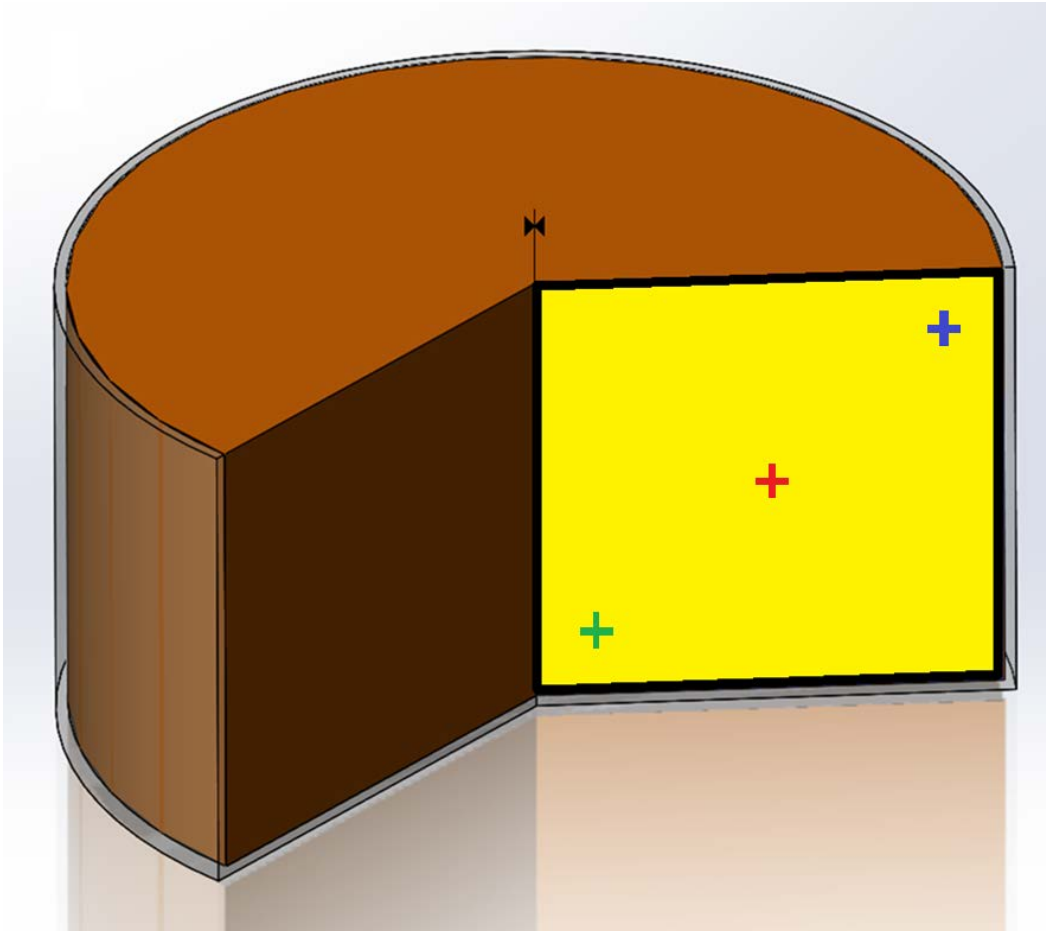


Figura 5.7 – Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro x 20 cm de altura.
*Sección radial de 20 cm x 20cm (en amarillo) sobre la que se analiza
 numéricamente el efecto de las condiciones de contorno
 sobre la retracción del suelo debido a desecación.*

5.2.1. Esquema CC01-PC01

Este primer esquema, resulta muy interesante para obtener conclusiones acerca del funcionamiento del modelo y para comprender algunos aspectos de la experimentación realizada en anteriores trabajos, respecto de la desecación. Por ejemplo, se corresponde con los ensayos de Nahlawi & Kodikara (2002) donde en la primera fase del ensayo se produce una contracción isótropa. Aunque el tamaño de la muestra y la simulación son muy distintos, los mecanismos desarrollados durante el proceso de desecación son los mismos como se verá en el apartado dedicado al arqueo.

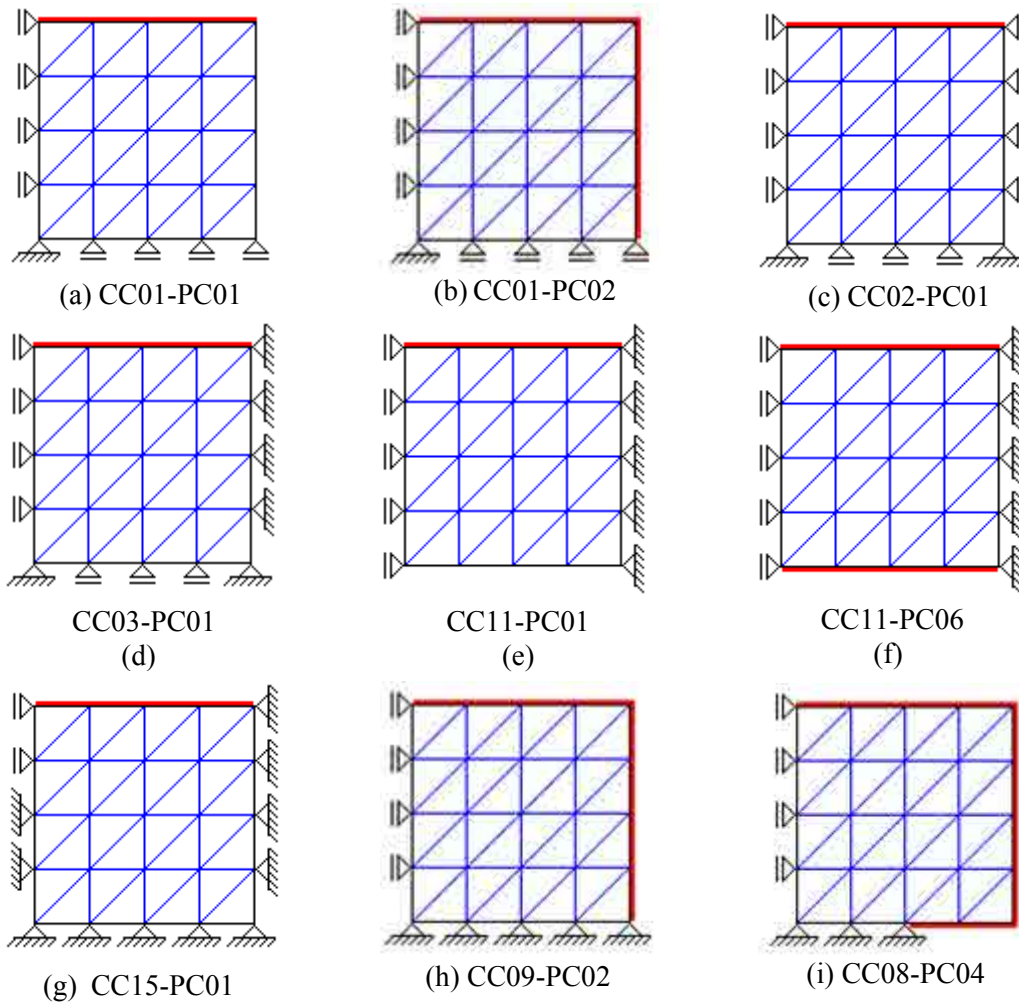


Figura 5.8 – Representación de las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión. La línea roja indica donde se impone la succión constante e igual a 60 MPa durante el proceso de desecación de 40 días. El borde vertical izquierdo es un eje de simetría axial.

Este esquema, Figura 5.8a, no es del todo realista ya que el suelo, al perder contacto con la bandeja en el borde derecho que lo sostiene, entrará en contacto con el ambiente y este impondrá un valor de succión de igual valor que en la cara superior. De todas formas, su estudio contribuye a la interpretación de los resultados del programa de elementos finitos. En la Figura 5.9a se muestra la configuración final de la porción de suelo simulada y el campo succiones; en b) el campo de tensiones horizontales. En primer lugar se observa que la deformación es más pronunciada en la zona inferior de la muestra. Este aspecto tiene su explicación en el hecho de que la rigidez de la masa de suelo depende de la succión (a mayor succión mayor rigidez) y durante el proceso de secado las zonas superiores son más rígidas que las zonas inferiores de la muestra. Debido a que la rigidez del suelo es función de la succión y del grado de saturación, además de no ser uniforme con la profundidad de la muestra, el comportamiento es en general complejo y contra-intuitivo.

Todas las tensiones son de compresión, porque las condiciones de contorno no propician otra cosa, es decir, no existen restricciones que favorezcan la aparición de tensiones de tracción. Las tensiones horizontales y verticales alcanzan valores similares y son mayores a mayor profundidad. Por otro lado, ya se ha visto en el apartado anterior que la succión produce compresión cuando se aplica desde el contorno exterior en ausencia de restricciones en los bordes.

En la Figura 5.9c se presenta la evolución de las tensiones con el tiempo y en la Figura 5.9d se muestra la relación tensión-deformación en tres puntos de referencia de la sección en estudio (definidos arriba y en la Figura 5.7). Se observa una ligera no linealidad en la relación tensión-deformación. Además, se observa la diferencia en comportamiento entre puntos cercanos a la condición de borde en succión y aquellos que se encuentran cerca del fondo de la bandeja, en cuanto a los valores de tensión alcanzados.

Sería interesante disponer de ensayos donde eliminase la adherencia entre suelo y bandeja para poder comprobar el comportamiento predicho por el código y además poder calibrarlo adecuadamente para estar en condiciones de hacer simulaciones predictivas y análisis cuantitativos del proceso. Un ensayo de estas características, pero de menor tamaño, es el analizado y simulado por (Kodikara, et al., 2004) que se estudia en un apartado posterior de esta tesis.

5.2.2. Esquema CC01-PC02

Este esquema es más realista, al estar la succión aplicada en el borde derecho además del borde superior. Los resultados obtenidos para este esquema se muestran en la Figura 5.10. Puede verse la influencia de la succión en todo el contorno expuesto al ambiente, haciendo que la matriz de suelo sea más rígida y por lo tanto menos deformable. De hecho la forma final mostrada en la Figura 5.10 se parece más a los perfiles obtenidos en el laboratorio (ver Figura 5.7 y Figura 5.46). El comportamiento cualitativo de las tensiones y deformaciones es similar al caso anterior, lo cual es lógico debido a que las condiciones de contorno en desplazamientos son las mismas y la succión es un campo de tensiones isótropo. Cuantitativamente, las tensiones son mayores en este caso debido a la mayor rigidez de la matriz de suelo, por estar sometida a una condición de contorno en succión más agresiva. Este hecho se observa claramente en la Figura 5.10c, donde se presenta la evolución de las tensiones con el tiempo. Los valores de tensión alcanzados son mayores y evolucionan más deprisa que en el caso anterior.

En cuanto a la relación tensión-deformación presentada en la Figura 5.10d, presenta la misma ligera no linealidad.

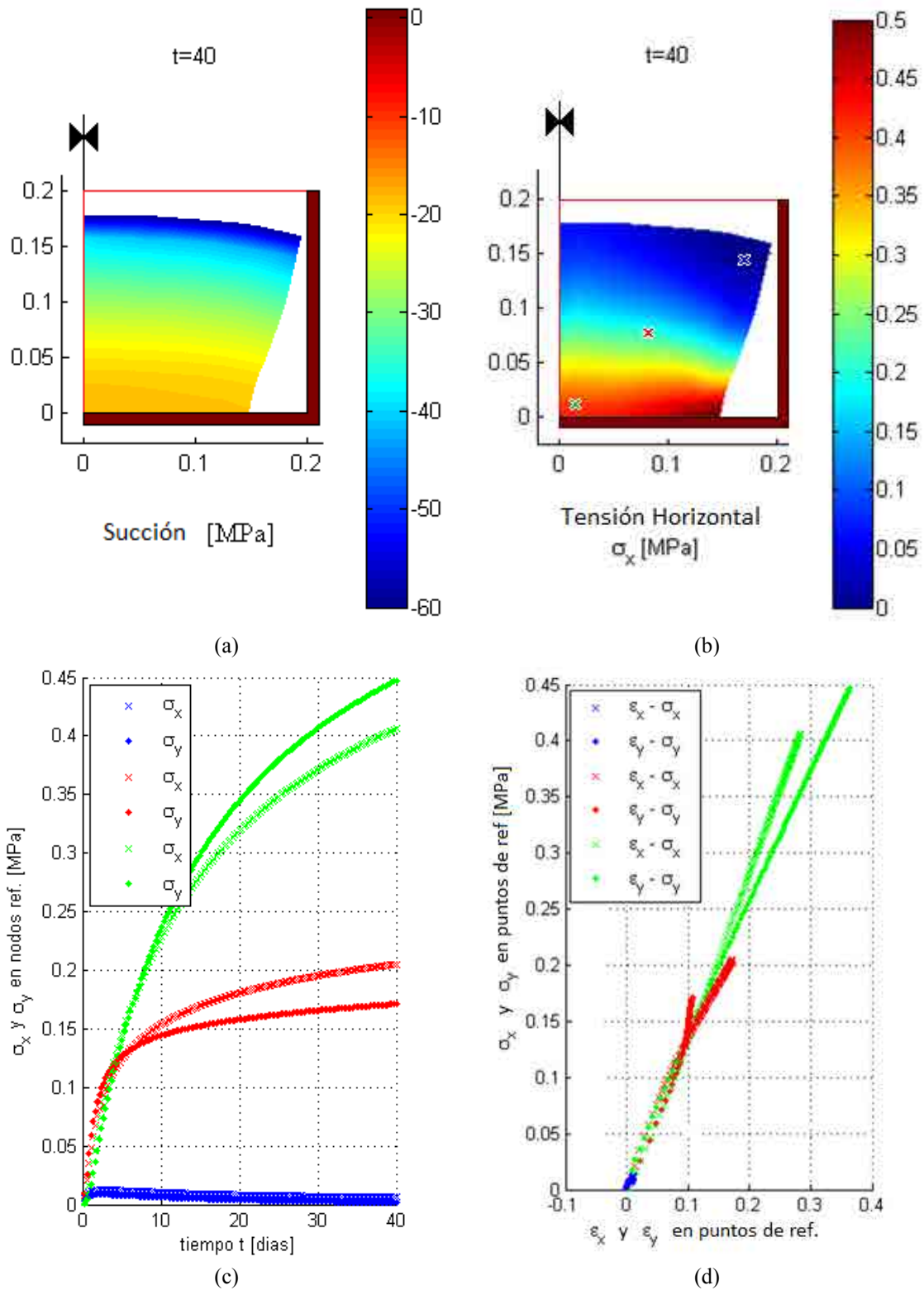


Figura 5.9 – Esquema CC01-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

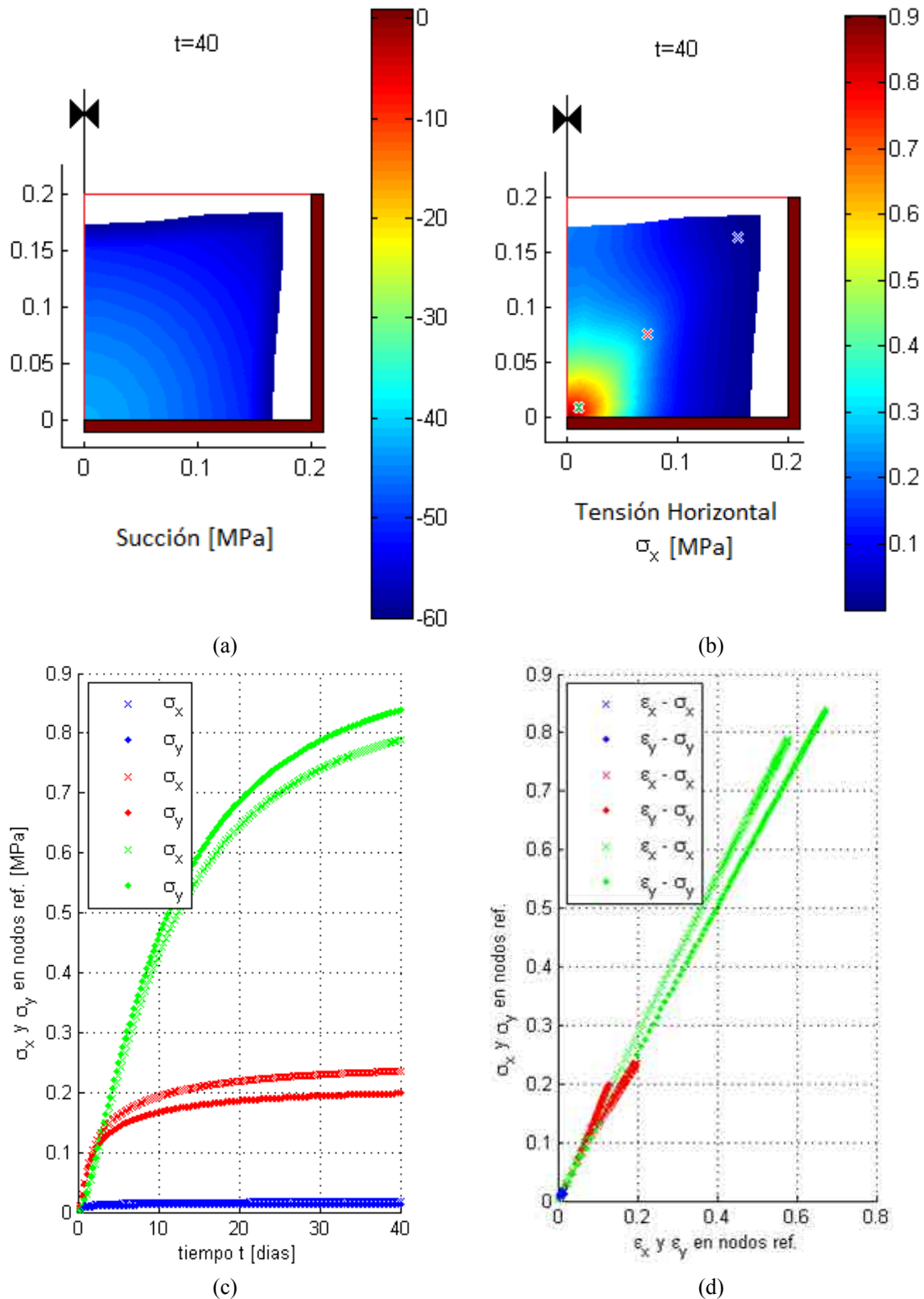


Figura 5.10 – Esquema CC01-PC02: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

5.2.3. Esquema CC02-PC01

Este esquema (Figura 5.8c) añade a los casos anteriores la restricción de desplazamientos horizontales del borde derecho que está en contacto con la bandeja contenedora (Figura 5.7) y la aplicación de succión en el borde superior.

Observando la configuración final de este esquema, en la Figura 5.11a y b, se ve que en este caso la deformación es prácticamente unidimensional cosa esperable debido a las condiciones de contorno y al hecho de que hay solo gradientes verticales de succión. En este esquema no aparecen tensiones de tracción horizontales a pesar de que se restringen los desplazamientos horizontales que aparecen en el esquema anterior. Esto se explica teniendo en cuenta que la relación constitutiva mecánica (ver Capítulo 4 Modelo Numérico) es incremental y la condición de contorno en succión solo produce incrementos en la dirección vertical. En el primer esquema estudiado la deformación del suelo produce una distorsión¹⁶ del campo de presiones, Figura 5.9a, generándose incrementos de presiones de poros en la dirección horizontal. En el segundo esquema la succión se aplica en el borde superior y lateral, por lo que hay incrementos de succión en dirección horizontal y vertical. En el presente esquema esto no se produce debido a las condiciones de contorno simétricas impuestas, lo que da por resultado este comportamiento cuasi-unidimensional sin que se produzcan tensiones de tracción horizontales.

En las Figura 5.11c y d se presenta la evolución de las tensiones con el tiempo y la relación tensión-deformación, respectivamente, en los tres puntos de referencia para el esquema estudiado. En esta figura se comprueba nuevamente que solo hay deformaciones verticales. Las tensiones verticales son mayores que las tensiones horizontales debido a que los gradientes de succión se dan sólo en la dirección vertical y las tensiones horizontales son sólo una consecuencia del efecto Poisson. En este caso, las tensiones horizontales y verticales son principales, por lo tanto las tensiones tangenciales en la dirección vertical y horizontal serán nulas.

En una muestra de suelo real, los perfiles de succión no serán en general homogéneos y el perfil de succión podrá provocar gradientes de succión también en la dirección horizontal produciendo tensiones tangenciales en las direcciones verticales y horizontales, lo cual podría generar tensiones de tracción en direcciones oblicuas que fueran capaces de originar una grieta. El modelo en su versión actual no tienen en cuenta dicha heterogeneidad con lo cual estos efectos no pueden ser cuantificados a pesar de que puedan llegar a ser importantes.

¹⁶ Si el medio fuera rígido el campo de presiones negativas de poros o succión dependería exclusivamente de las condiciones de contorno en succión. La deformación de la muestra distorsiona dicho campo debido a que las deformaciones no son infinitesimales lo cual genera un efecto de segundo orden.

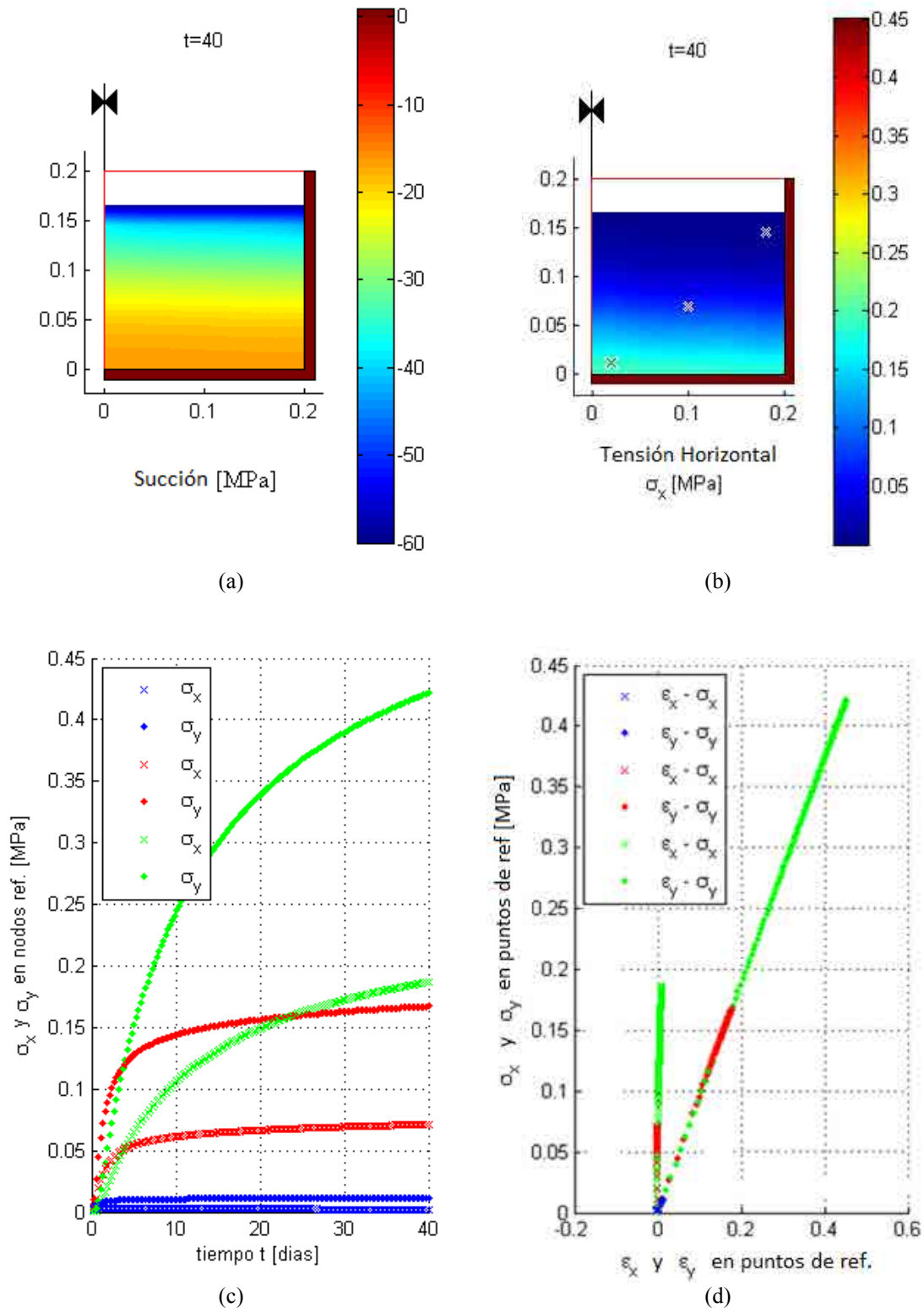


Figura 5.11 – Esquema CC02-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

5.2.4. Esquema CC03-PC01

Este esquema (Figura 5.8d) se corresponde mejor con los ensayos realizados en bandejas circulares tanto en la tesis de Lakshmikantha (2009) como en esta tesis, ya que las restricciones en los desplazamientos impuestos en la cara derecha y en el fondo reproducen la adherencia entre el suelo y la bandeja contenedora (Figura 5.7). Lo más importante es que este tipo de restricciones producen la aparición de tensiones horizontales de tracción, capaces de producir a su vez agrietamiento en la zona superior en contacto con la bandeja propagándose luego hacia abajo como es usual que ocurra en el laboratorio, siempre y cuando se pueda garantizar la adherencia entre suelo y bandeja. Esta adherencia es difícil de caracterizar puesto que depende del tiempo y del grado de saturación del suelo y éste a su vez varía con el tiempo y en función del patrón de agrietamientos que se desarrolla a lo largo del proceso de desecación. Por otro lado, esta adherencia será en general mayor en profundidad en las paredes del recipiente debido a que habrá mayor compresión cuando la muestra de suelo se coloque en la bandeja. Finalmente, la adherencia en el fondo de la bandeja varía mucho según la bandeja tenga un fondo rugoso o liso.

De nuevo cabe resaltar que las condiciones de contorno en desplazamientos producen una distorsión del campo de succiones que a su vez produce gradientes de tensiones en la dirección horizontal, lo cual propicia la aparición de tensiones de tracción capaces de producir agrietamiento. Como se verá posteriormente en la simulación del agrietamiento, la grieta comenzará en la superficie superior y se propagará hacia abajo alcanzando el fondo de la muestra como ocurre en el laboratorio.

En la Figura 5.12a y b se presentan el campo de succión y las tensiones horizontales y verticales a los 40 días de ensayo. En la Figura 5.12b se ve claramente que en la zona del punto de referencia azul, arriba a la derecha, las tensiones horizontales y verticales son de tracción, siendo las tracciones mayores en la dirección horizontal. Esto indica sin lugar a dudas que las condiciones de inicio de agrietamiento en dicha zona están garantizadas y se producirán una vez alcanzada la resistencia a tracción del suelo.

En la Figura 5.12c, se ve la evolución de las tensiones horizontales y verticales durante el proceso de secado. Se observa como la tensión horizontal alcanza valores mayores y más rápidamente que la tensión vertical en el punto de referencia azul. En los otros dos puntos de referencia, rojo y verde, se observa que las tensiones verticales son mayores que las horizontales lo cual tienen sentido puesto que estos puntos están fuera de la zona de influencia de la condición de contorno del borde derecho y el modelo recupera el comportamiento previamente estudiado en los apartados anteriores y que corresponde a una contracción sin restricciones. Como puede comprobarse, los valores de tensiones de tracción son de 0.1 MPa en este ejemplo, lo cual supera con cre-

ces la resistencia a tracción del suelo utilizado que varía según las condiciones entre 0 y 0.0035 MPa (Lakshmikantha, 2009). Que las tracciones sean mayores en la dirección horizontal indica que la grieta tenderá a ser vertical. El análisis de la propagación de la grieta se hace en un apartado posterior.

La distorsión del campo de succión provoca sin embargo un cambio en las direcciones principales que dejan de ser la horizontal y vertical cuando la sección se deforma. Sin embargo, estos cambios serán relativamente pequeños teniendo en cuenta que la forma real deformada del suelo no es exactamente como muestra la simulación, sino menos distorsionada.

5.2.5. Esquema CC11-PC01

En este esquema (Figura 5.8e) la succión se aplica en la cara superior. En la Figura 5.13a se observa el aspecto del campo de succión después de 40 días de secado. En este caso las condiciones de contorno en desplazamientos equivalen a un caso de **no adherencia** con el fondo de la bandeja contenedora. Esto no está muy lejos de la realidad teniendo en cuenta que en los primeros días el lodo de arcilla es muy fluido y su comportamiento es el de un líquido espeso con poca adherencia.

Se puede ver que al final del proceso de desecación se han desarrollado tracciones en la dirección horizontal (Figura 5.13b) capaces de producir grietas tanto en la parte superior como en la inferior de la muestra aunque de mayor valor en la esquina superior derecha. Nuevamente, las tracciones en la dirección horizontal son mayores que en la vertical y evolucionan más deprisa que las verticales, como se observa en la Figura 5.13c. Esto indica a primera vista que las grietas pueden aparecer también desde el fondo de la muestra tal y como se pudo comprobar en los ensayos. Se observa además, que el hecho de no haber adherencia con el fondo de la bandeja permite al suelo un comportamiento de arqueado que se estudiará en detalle en apartados posteriores. Este arqueado es un comportamiento típico sobre todo cuando no hay grietas (las grietas reducen el efecto de arqueado como se verá más adelante) y las arcillas son muy plásticas. La arcilla de Barcelona presentó esta característica de forma bastante moderada en los ensayos de Lakshmikantha (2009).

En la Figura 5.13c y d, se presenta la evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo y la relación tensión-deformación en los tres puntos de referencia. Se observa, el desarrollo de tensiones de tracción en la esquina superior derecha en contacto con la bandeja.

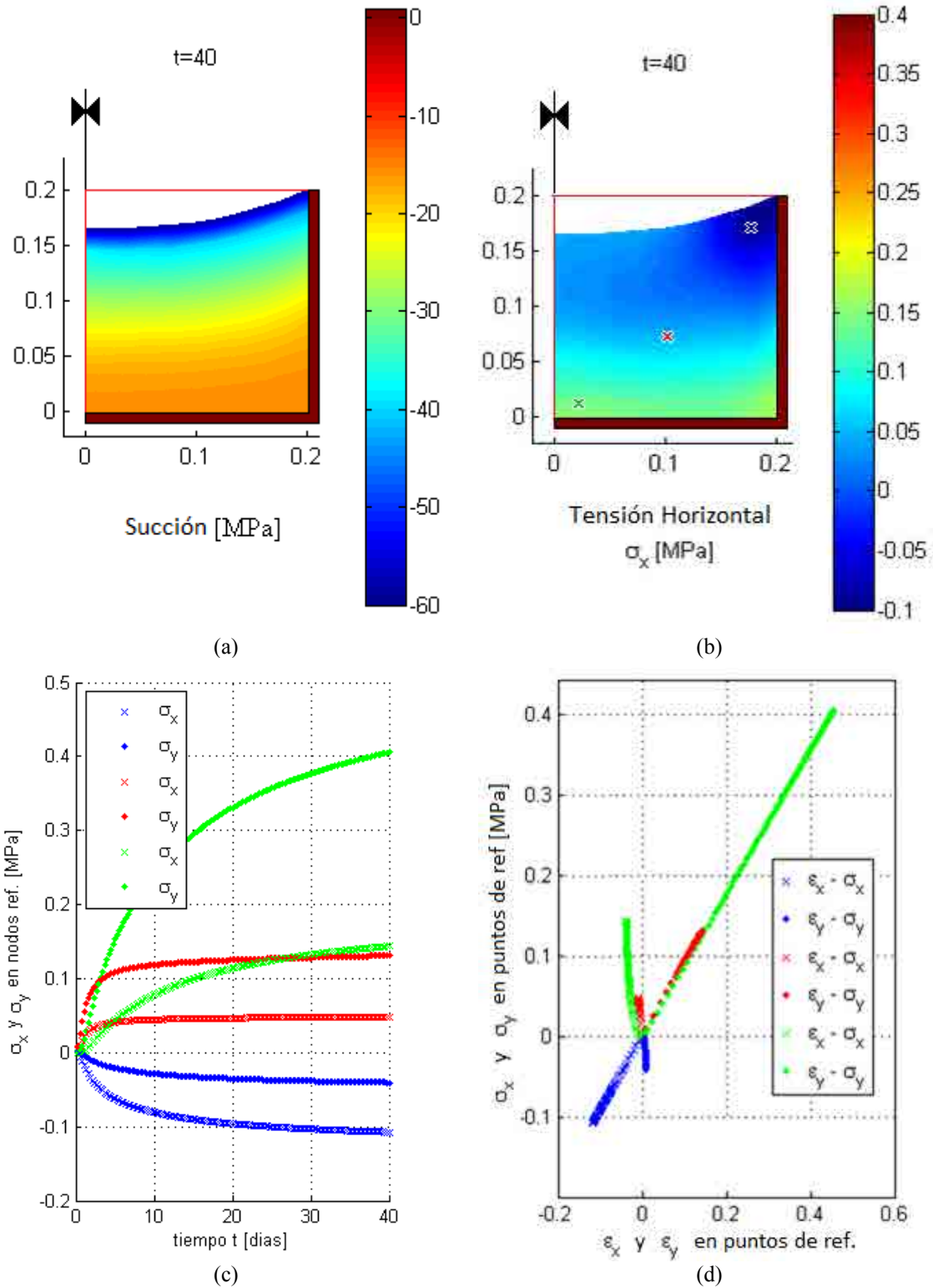


Figura 5.12 – Esquema CC03-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

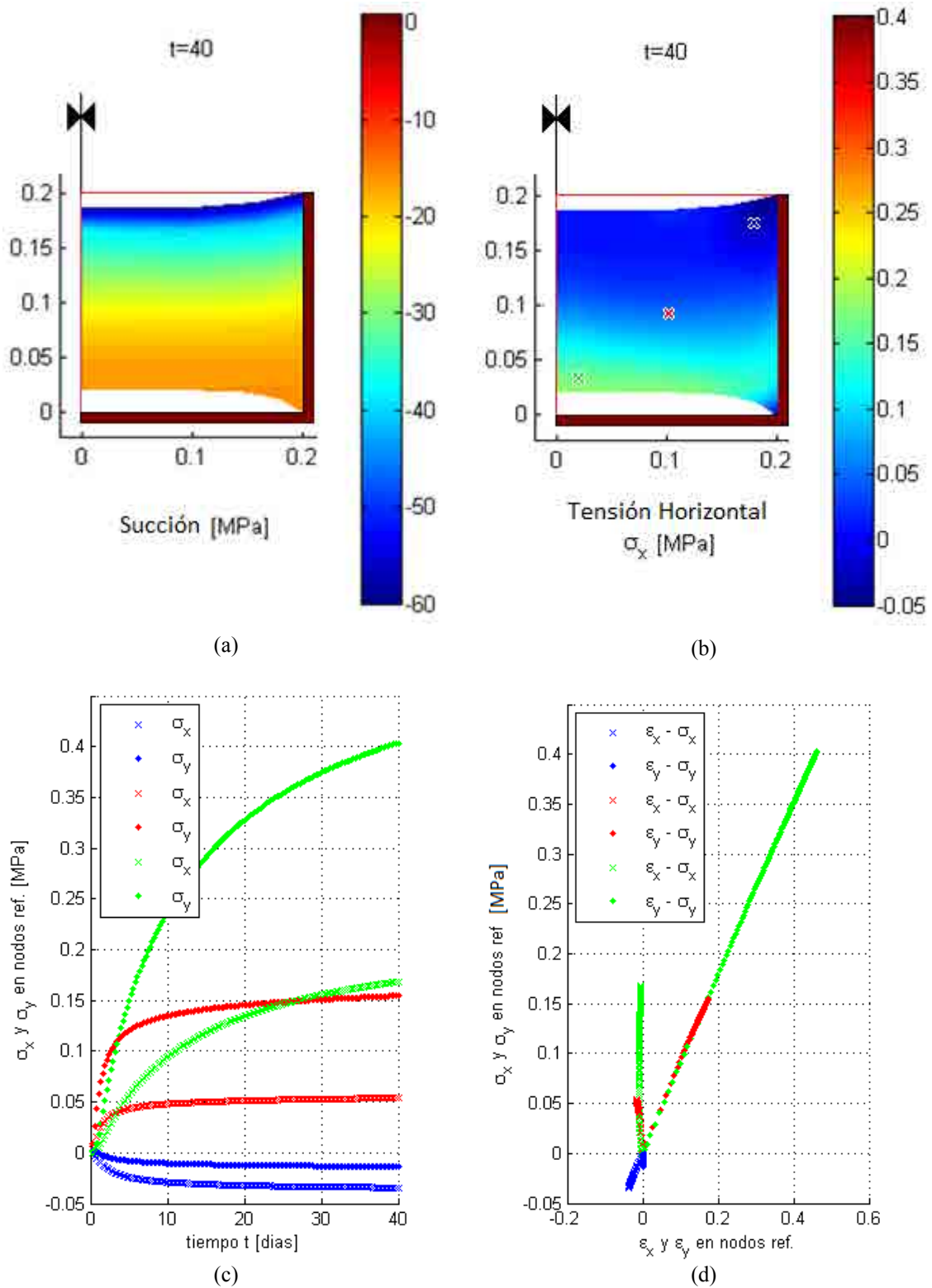


Figura 5.13 – Esquema CC11-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

El modelo predice la posibilidad de que las grietas comiencen desde arriba o desde abajo. Esas grietas verticales se pueden encontrar a media altura de la muestra y propagar siguiendo la curvatura de la bandeja como se observa en el laboratorio. Ver por ejemplo la evolución del agrietamiento en el Capítulo 3 Análisis Experimental (GPR aplicado a la auscultación de suelos en desecación y agrietamiento).

5.2.6. Esquema CC11-PC06

En este esquema la succión se ha aplicado en las caras superior e inferior (Figura 5.8f) y las condiciones de contorno en desplazamientos son las mismas que en el caso anterior. Nuevamente, el proceso produce tracciones horizontales capaces de producir grietas tanto en la parte superior como en la inferior de la muestra aunque de valor ligeramente mayor en la superior (Figura 5.14b). La diferencia es sólo debida a la aproximación del método y la solución analítica exacta debería ser simétrica debido a la simetría de cargas y restricciones. Esto indica a primera vista que las grietas pueden aparecer también desde el fondo de la muestra tal y como se pudo comprobar en los ensayos. Por otro lado, respecto del caso anterior, el hecho de imponer succión tanto en el contorno superior como en el inferior ocasiona el desarrollo de una mayor rigidez del suelo en menos tiempo, reduciendo así las deformaciones. Además, la desecación es más rápida como puede observarse en la Figura 5.14a donde observa un campo de succión mucho más desarrollado que en el caso anterior para los mismos 40 días de desecación.

En la Figura 5.14c y d se presenta la evolución de las tensiones con el tiempo y la relación tensión-deformación en los puntos de referencia. Otro efecto importante es la disminución del arqueado al aplicar la succión sobre ambos contornos, esto puede explicar, al menos, parcialmente porque algunos suelos no presentan arqueado de manera apreciable. El efecto de la succión en cuando a la rigidez de la matriz del suelo y el agrietamiento reducen en conjunto el efecto de arqueado.

5.2.7. Esquema CC15-PC01

El esquema CC15-PC01 (Figura 5.8g) modifica las condiciones de contorno del eje de simetría añadiendo restricciones en la dirección vertical. Los resultados en la Figura 5.15 indican tensiones de tracción a la izquierda y derecha del borde superior debido a estas nuevas condiciones de contorno impuestas. La esquina superior izquierda se corresponde con el centro de una bandeja cilíndrica.

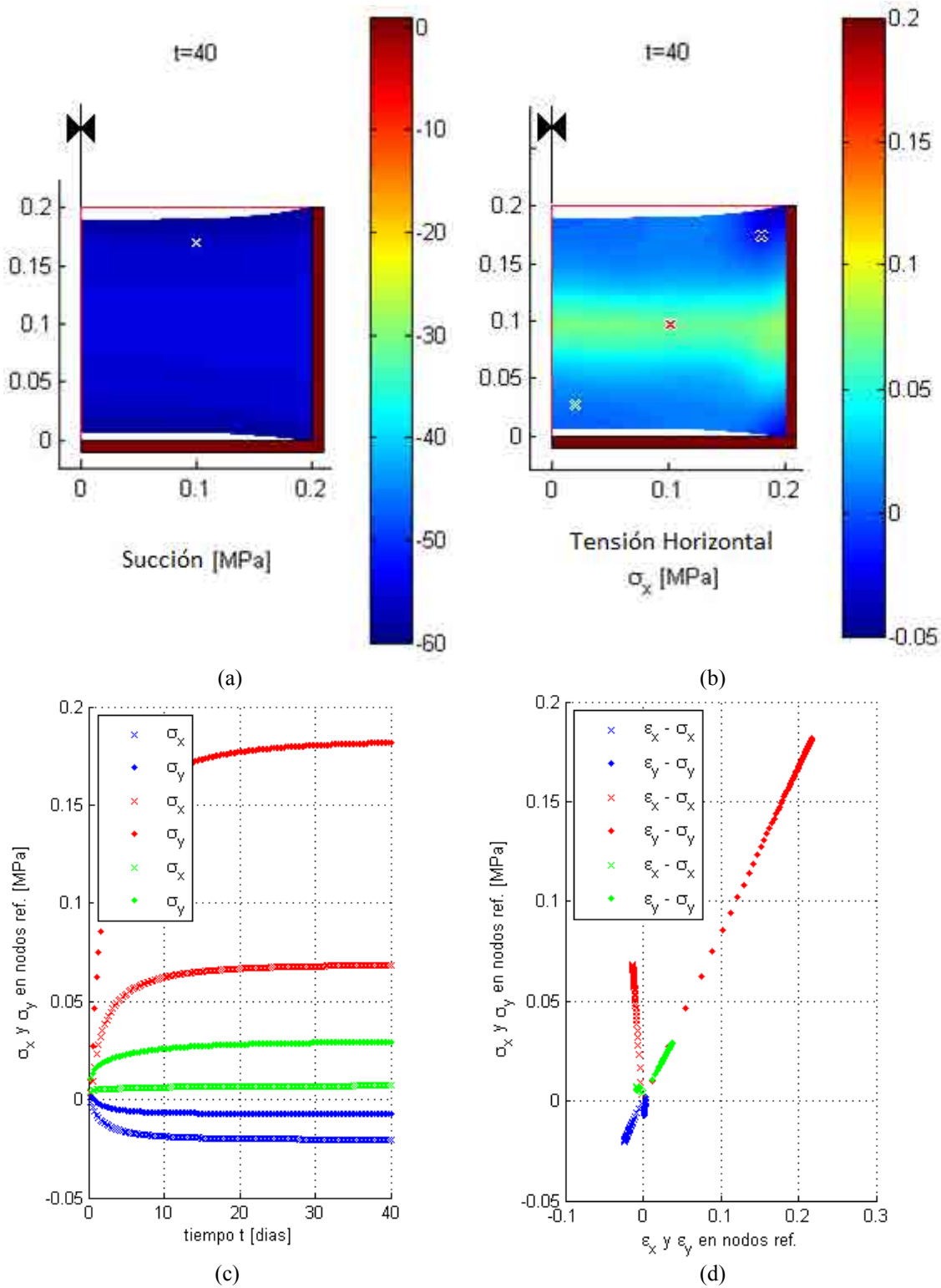


Figura 5.14 – Esquema CC11-PC06: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

Es importante poder forzar este tipo de comportamiento para poder simular el caso en que las grietas que aparecen están ubicadas hacia el interior de la muestra. En relación con los ensayos de laboratorio esto se justifica puesto que a medida que avanza la desecación, las porciones de suelo se secan más o menos rápidamente según su capacidad de humedecimiento específico. Un defecto, micro-fisura o permeabilidad diferente en la masa de suelo condiciona no solo la pérdida de humedad sino también el grado de rigidez de la matriz de suelo provocando condiciones de contorno mecánicas con respecto al suelo adyacente lo cual puede generar tensiones de tracción que agrieten el suelo.

La tensión de tracción en el centro de la muestra durante la simulación es de menor valor y evoluciona más lentamente que la obtenida en el contacto con la bandeja, lo cual es consistente con el hecho de que la grieta en contacto con la bandeja es la primera en producirse.

En la Figura 5.15 c y d se presenta la evolución de las tensiones con el tiempo y la relación tensión-deformación en los puntos de referencia. Se observa nuevamente que los valores de tensión de tracción alcanzados son más que suficientes para producir agrietamiento.

5.2.8. Esquema CC09-PC02

Este esquema (Figura 5.8h) se corresponde con un suelo contenido en una bandeja sin adherencia con la pared lateral. También se corresponde al caso en que se ha producido una grieta perimetral separándose el suelo de la pared lateral del molde mientras que continúa desecándose. En la Figura 5.16 se muestran, en a) el campo de succión y en b) tensiones verticales después de 40 días de secado. En la Figura 5.16c se observan en general compresiones que son mayores en la dirección vertical. Las tensiones horizontales y verticales se reducen a cero en la esquina inferior derecha, punto en el cual suele producirse el desprendimiento del suelo por efecto de arqueado. Si bien la tensión vertical no es de tracción en ese punto sino nula, esta tensión no es la tensión principal. Las tensiones horizontales y verticales no son principales porque la succión aplicada a los bordes superior y lateral genera gradientes de succión en una dirección oblicua que no será ni horizontal ni vertical y el campo de succión se ve distorsionado además por la deformación. Esto, sumado al efecto de las restricciones en el fondo de la bandeja producirán tensiones tangenciales que forzarán direcciones principales distintas a la vertical u horizontal. Como las tensiones verticales y horizontales son nulas o muy pequeñas, las tensiones tangenciales pueden llevar a producir tensiones de tracción en la dirección principal menor. Un análisis más detallado de esta condición de contorno se realiza en el apartado 5.4.2 Análisis de la Desecación en Muestras de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura.

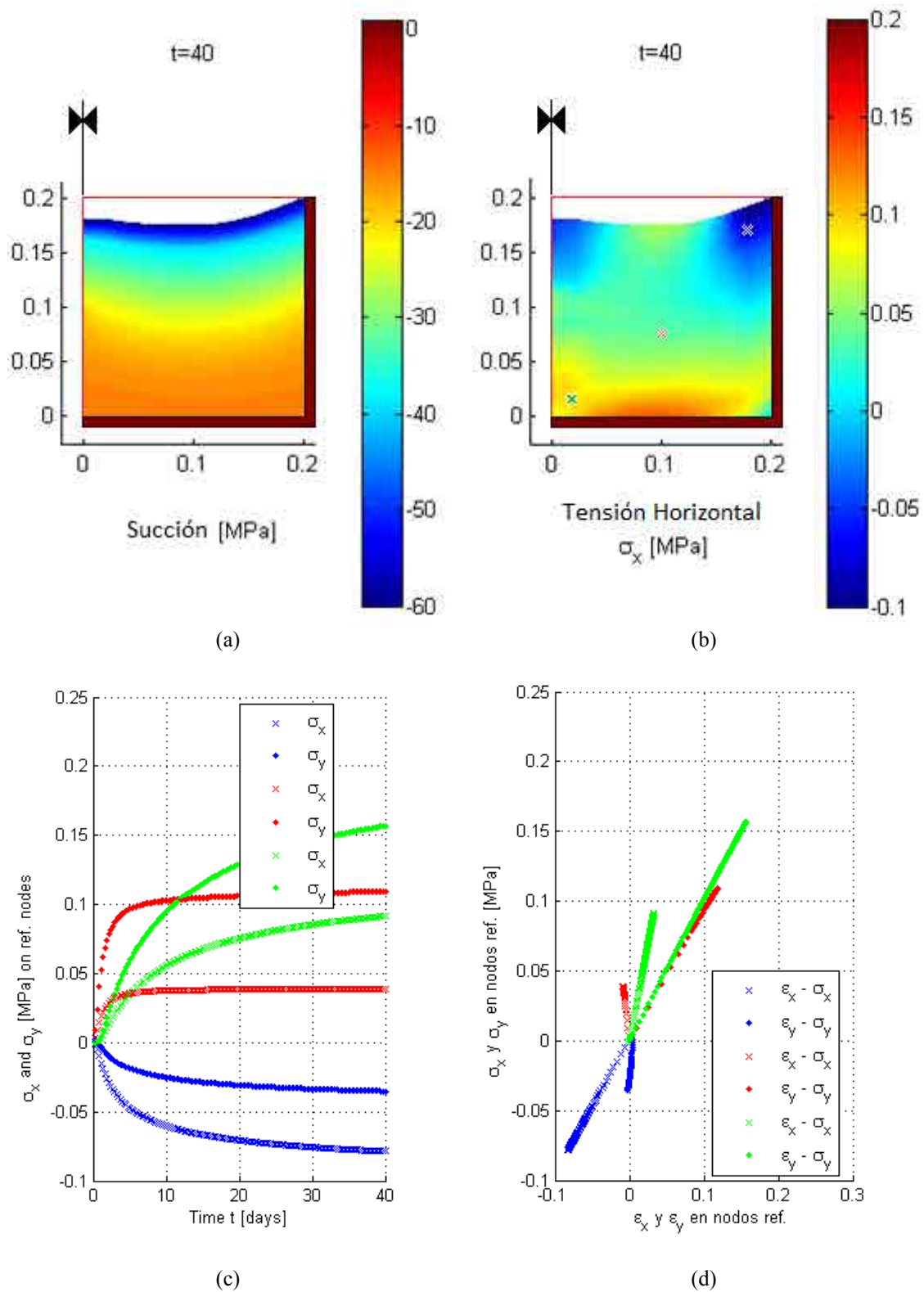


Figura 5.15 – Esquema CC15-PC01: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

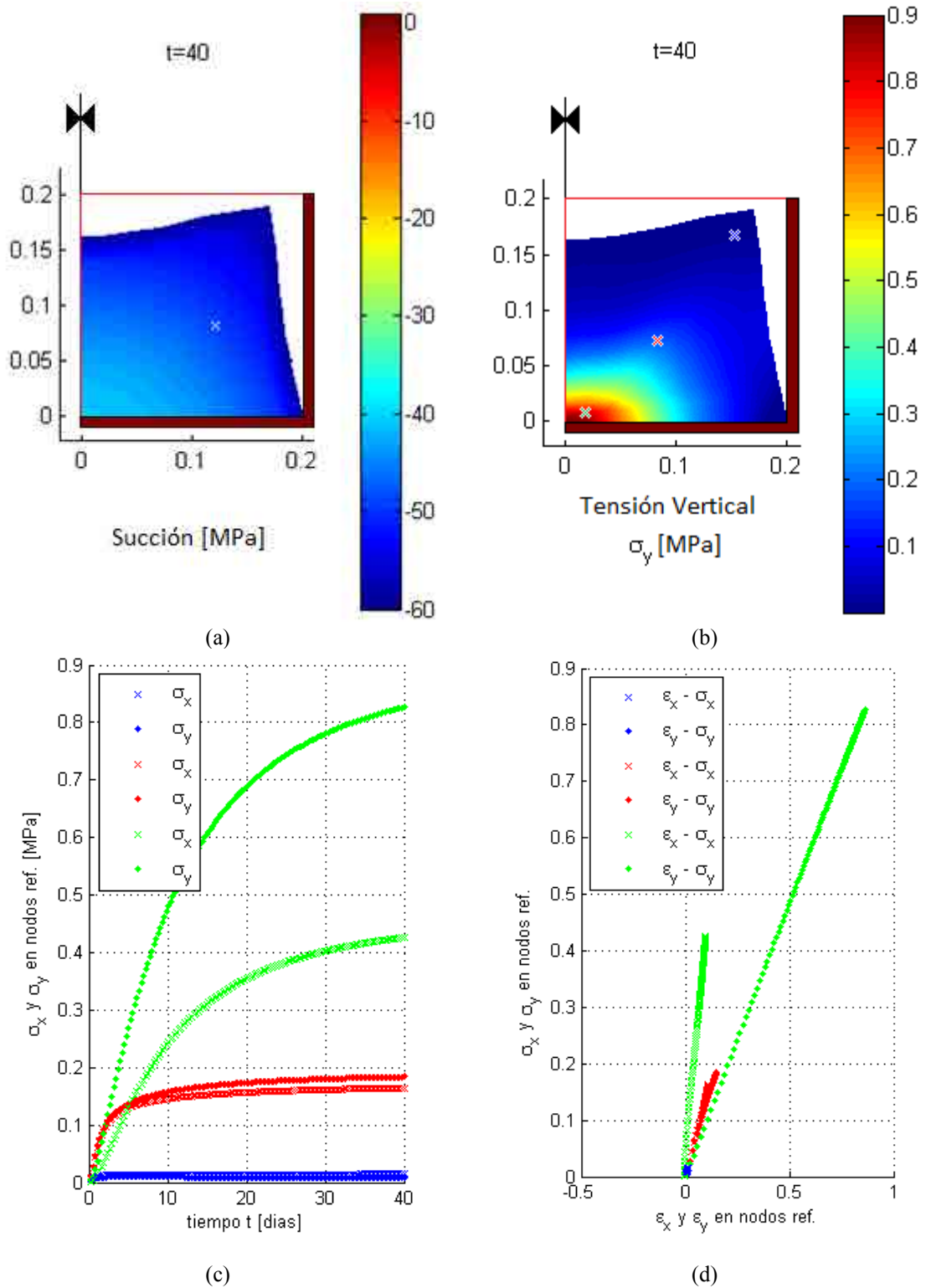


Figura 5.16 – Esquema CC09-PC02: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

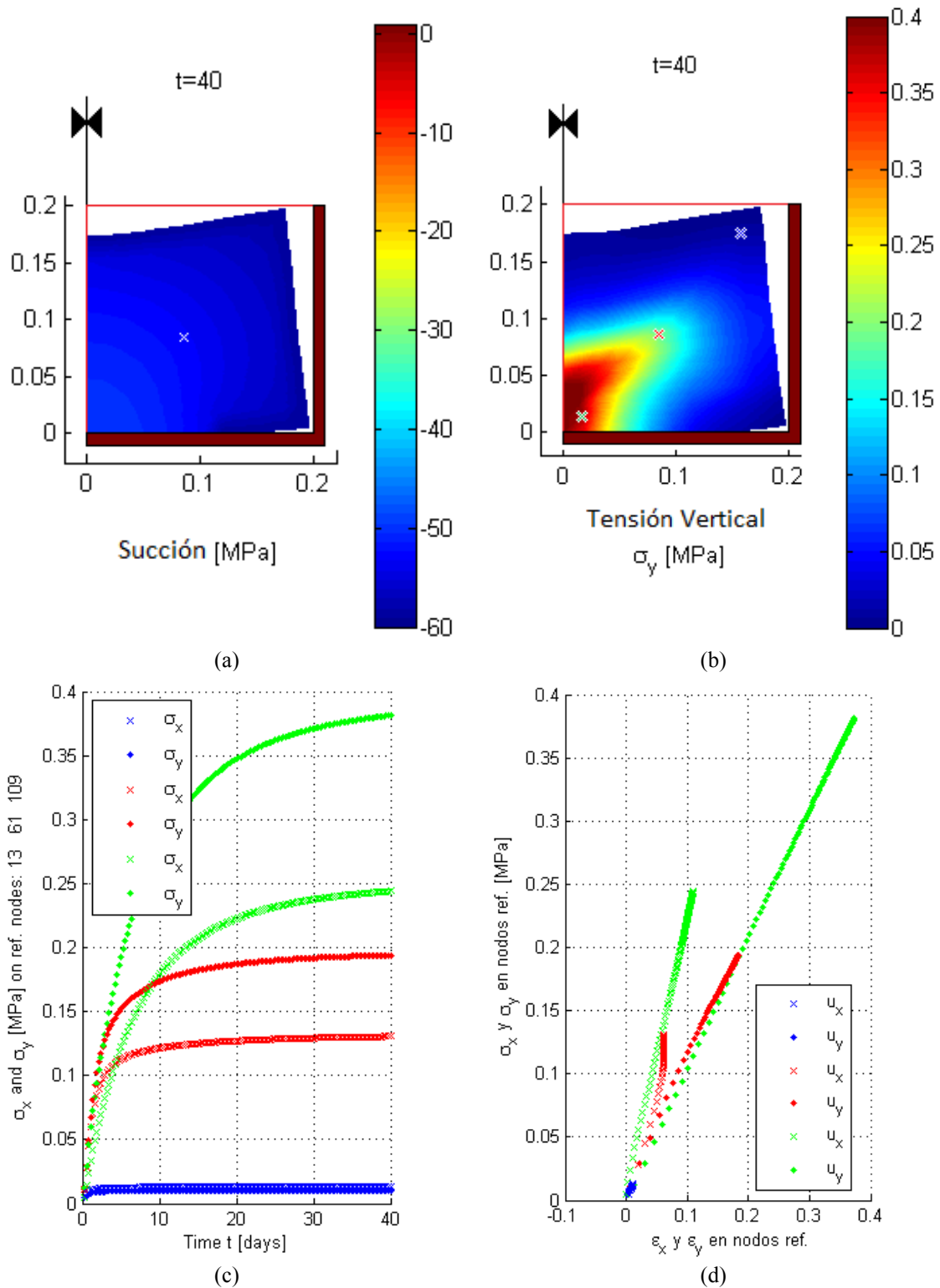


Figura 5.17 – Esquema CC08-PC04: a) campo de succión; b) tensión horizontal a los 40 días de secado; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales; d) relación tensión-deformación. Puntos de referencia: azul = arriba derecha, rojo = centro, verde = abajo izquierda. Dimensiones en metros.

5.2.9. Esquema CC08-PC04

El último esquema analizado (Figura 5.8i), se corresponde con la desecación en una muestra que arquea y que no está en contacto con el borde lateral de la bandeja y se separa parcialmente del fondo de dicha bandeja.

Se investiga si existen tensiones de tracción que ocasionen la propagación de una grieta, en el borde inferior de la sección, en el contacto entre el suelo y el fondo de la bandeja contenedora. Además, como afecta a la deformación que la superficie del fondo de la muestra se exponga al ambiente que seca la muestra.

En la Figura 5.17 se presentan: a) la succión; b) las tensiones verticales después de 40 días de secado. Se observa claramente la deformación por arqueado. En c) se observa que las tensiones verticales de compresión son mayores que las horizontales. Las tensiones horizontales y verticales tienen valores nulos en muchos puntos de la geometría induciendo tracción en los planos principales que podrán ser fuente de nuevas grietas debido a que la retracción de la sección deforma los contornos donde se aplica la succión que dejan de ser contornos horizontales y verticales. La condición de contorno en este esquema es compleja, ya que se aplica al borde superior, lateral derecho y parcialmente en el fondo.

5.2.10. Conclusiones sobre la Influencia de las Condiciones de Contorno en una Sección Radial de Muestras Cilíndricas

En general el modelo produce resultados que son consistentes con los ensayos de laboratorio. La evolución temporal de la succión y las tensiones, la retracción y la forma final de las secciones estudiadas se corresponden bien con lo observado en el laboratorio. Además, permite justificar la aparición de grietas desde varios puntos que son los habituales durante los ensayos con lo cual se puede afirmar su utilidad para realizar análisis de desecación e inicio de agrietamiento.

Las simulaciones presentadas hasta aquí muestran que las condiciones de contorno juegan un papel fundamental en la definición de las zonas donde se producen los inicios de agrietamiento. El borde superior de la sección tiene asociado siempre una condición de contorno en succión que normalmente será constante en el laboratorio pero no así en el campo. El borde lateral izquierdo es un eje de simetría y no sufrirá cambios en general. Los bordes lateral derecho e inferior pueden tener distintas condiciones de contorno en desplazamientos que evolucionan con el proceso de manera gradual entre los esquemas estudiados en esta sección. Además, debido a su

posición el borde inferior recibe la presión uniforme de todo el peso del suelo que va disminuyendo, mientras que el borde lateral está sujeto a presiones crecientes desde arriba que cambian según transcurre la desecación y se produce el agrietamiento. Todo esto interactúa para definir los campos de tensiones de la matriz de suelo durante la desecación.

Como se ha dicho la adherencia entre suelo y bandeja es compleja y cambiante a lo largo del proceso. Las simulaciones demuestran que las condiciones de contorno pueden determinar el origen del agrietamiento tanto desde la superficie de una muestra como desde el fondo siempre y cuando se den las condiciones adecuadas.

El agrietamiento produce unas condiciones de contorno en succión complejas que junto a la deformación de la muestra generan cambios en las direcciones principales de tensión. Esto implica la necesidad de un análisis en tensiones principales cuando las deformaciones sean importantes y cuando la condición de contorno en succión sea compleja.

En la realidad existen varios otros factores que promueven la aparición de grietas además de las condiciones de contorno. La heterogeneidad, los defectos, micro-fisuras o partículas de gran tamaño pueden condicionar la aparición de grietas. Se ha visto en el laboratorio que la instrumentación (tensiómetros¹⁷, sensores Decagon¹⁸, sensores Vaisala¹⁹, etc.) a veces generan agrietamiento y a veces no. Las razones de este hecho son de momento desconocidas. En el modelo propuesto, la única forma de reproducir dichos efectos es modificando alguna de las condiciones de contorno. La heterogeneidad del medio viene dada por la estructura de la arcilla, por el procedimiento de preparación de las muestras y porque las propiedades de la arcilla son cambiantes con el grado de saturación y la succión.

¹⁷ Los tensiómetros T5X son sensores que miden succión con un rango de entre 100 y -200 kPa aproximadamente (<http://www.ums-muc.de/en/products/tensiometer/t5.html>)

¹⁸ Los sensores Decagon son sensores que miden temperatura, contenido volumétrico de humedad y conductividad eléctrica del suelo (<http://www.decagon.com/products/soils/volumetric-water-content-sensors/>)

¹⁹ Los sensores Vaisala son sensores que miden la temperatura y la humedad relativa del suelo (<http://www.vaisala.com/en/products/humidity/Pages/default.aspx>)

5.3. Efecto de las Grietas en el Proceso de Dsecación

A la complejidad que presenta el modelo hidromecánico se añade en este problema el agrietamiento. Debido a la dificultad de su tratamiento, una forma simplificada es estudiar directamente el efecto de grietas estáticas²⁰ en el medio. Las grietas modifican las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión, lo cual modifica el perfil de succión y por consiguiente el campo de tensiones en la matriz de suelo, como ya se ha visto en el apartado anterior. La presencia de grietas afecta además al comportamiento mecánico del conjunto, modificando las deformaciones producidas durante el proceso de secado. En este apartado se muestra la influencia que tiene una grieta central de diferentes longitudes sobre el comportamiento en desecación de una muestra de suelo sometida a un semi-ciclo de secado. Con estas simulaciones queda en evidencia que el efecto de arqueo es muy importante y tiene influencia sobre la deformación de la muestra. También se observa que el agrietamiento reduce el efecto de arqueo y que influye en la evolución de la desecación.

La implementación de la propagación del agrietamiento en el modelo hidromecánico es complicada por varios motivos. En primer lugar, cuando se forma una grieta y posteriormente se propaga, es necesario recurrir a un algoritmo de remallado automático que tiene mucha complejidad de implementación y consume tiempo de cálculo debido a la actualización necesaria desde la malla antigua a la actual y al proceso mismo de remallado. Por otro lado, una vez incorporada la grieta, el equilibrio del problema se pierde y hay que restituirlo mediante un proceso iterativo que también consume tiempo de cálculo y no siempre converge. Para el problema hidromecánico, en todas estas simulaciones, se parte del suelo en estado saturado, lo cual se traduce en una condición inicial de succión nula. La imposición de la succión en los bordes, con valores de cientos de MPa introduce un problema de inestabilidad en la solución del sistema de ecuaciones emergentes del método de elementos finitos, lo cual produce oscilaciones en la solución sobre todo en los puntos cercanos al contorno. Las grietas añaden inestabilidad porque implican nuevas condiciones de contorno en succión y cambian bruscamente la geometría del problema en un paso de tiempo de cálculo. Gestionar todos estos problemas a la vez se torna complicado. Si bien se ha podido implementar la propagación de una grieta, a veces es preferible utilizar el código hidromecánico para realizar análisis sin añadir la complejidad del remallado y la restauración del equilibrio.

²⁰ Grietas estáticas: son grietas que no evolucionan con el tiempo. Se estudia el efecto de la geometría de la grieta sobre el esquema numérico en estudio comparando la respuesta del modelo con y sin grietas o bien con diferentes longitudes de grieta.

Sin embargo, la influencia de las grietas en el proceso resulta fundamental. Por este motivo se analiza el efecto de grietas estáticas, es decir, de la geometría de la grieta sobre el comportamiento en desecación. En los siguientes apartados se analizan la influencia de una grieta central y de las grietas que normalmente se desarrollan en el contacto con las bandejas en muestras cilíndricas como la que se presenta en la Figura 5.18.

5.3.1. Influencia de una Grieta Central en la Dsecación

Para este estudio se han utilizado los esquemas que se recogen en la Figura 5.19. Se ha evitado imponer condiciones de contorno en desplazamientos en la base de la muestra para ver cómo afecta a la deformación, sobre todo al efecto de arqueo, la longitud de la grieta central. Se ha observado que existe un efecto de arqueo bastante pronunciado cuando no hay grieta central. Este fenómeno tiene interés puesto que ocurre muchas veces en procesos de desecación de suelos. Se ha considerado la muestra sin peso propio porque este reduce el efecto de arqueo. Además, de esta forma se centra el análisis en los efectos de la succión y las geometrías de las grietas sobre el comportamiento de la sección en estudio.

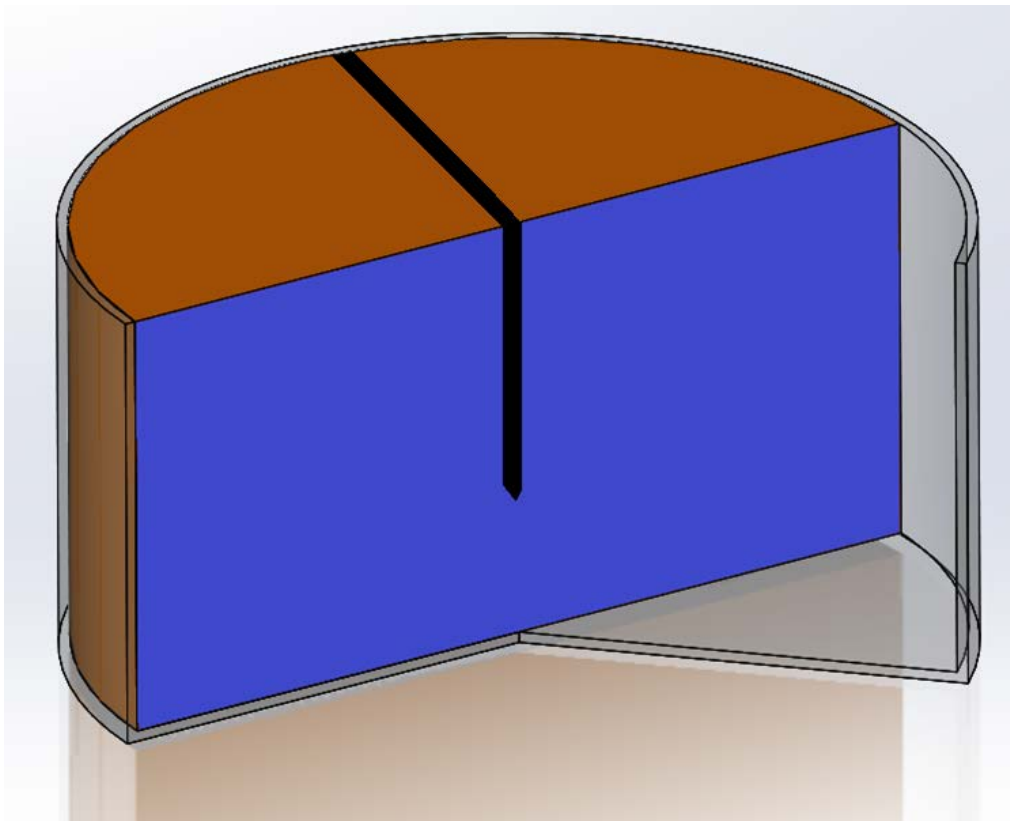


Figura 5.18 – Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro \times 20 cm de altura. Sección diametral de 40 cm \times 20 cm (en azul) sobre la que se analiza numéricamente la influencia de una grieta central

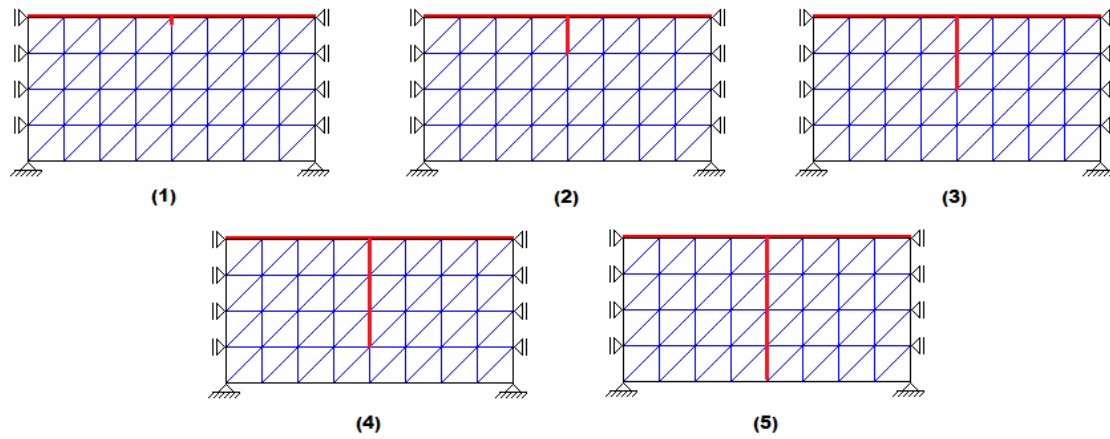


Figura 5.19 - Esquemas utilizados para la simulación con la geometría de la Figura 5.18 y grieta central de 1, 5, 10, 15 y 19 cm de profundidad

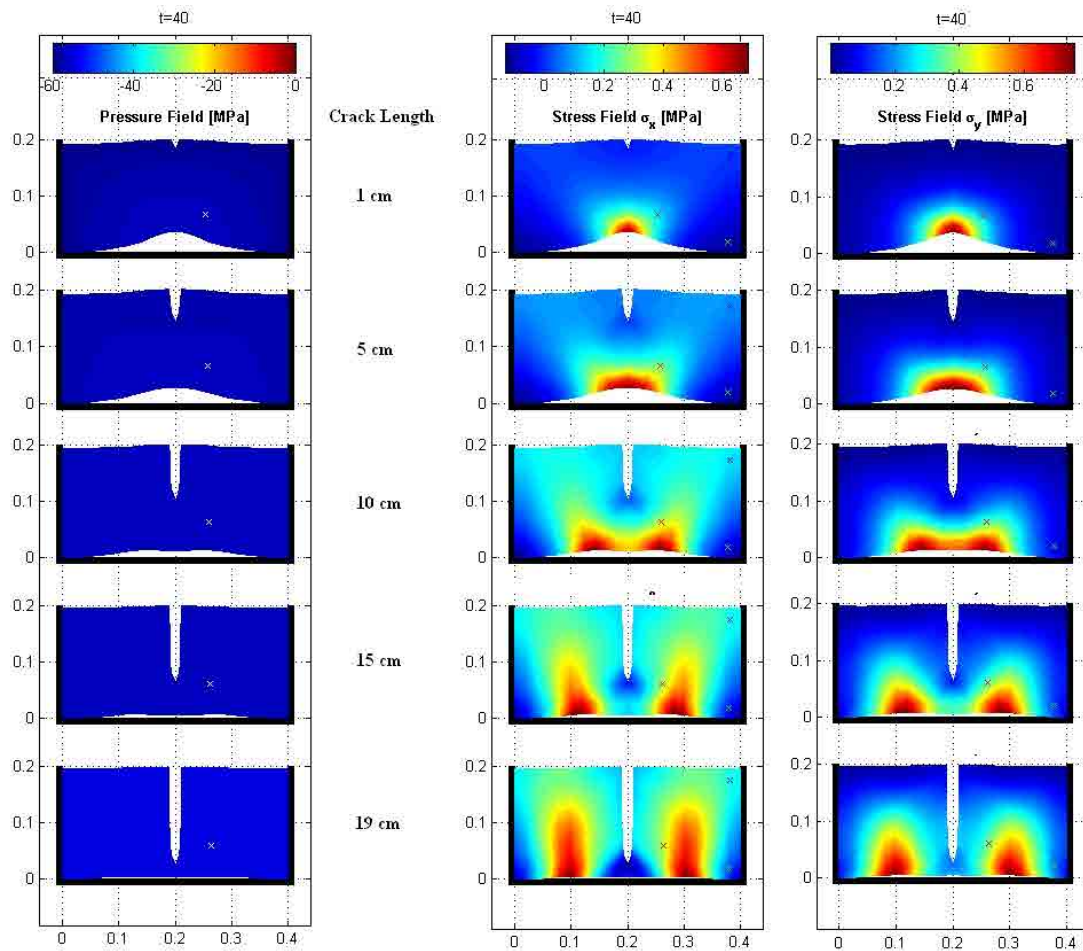


Figura 5.20 - Influencia de la profundidad de una grieta central en los campos de succión y tensiones horizontales y verticales después de 40 días de secado. *Nodo de referencia sobre el campo de succión indicado por una cruz blanca en las inmediaciones de la grieta.*

Los resultados de las simulaciones se presentan en la Figura 5.20. Se presentan cinco casos con profundidad de grieta de 1, 5, 10, 15 y 19 cm. En dicha figura se ven los campos de presión de poros al final de la simulación que representa 40 días de secado, así como también los campos de tensiones horizontales y verticales. La duración del ensayo así como también el valor de succión impuesta, 60 MPa, son valores usuales en ensayos de laboratorio para muestras de las dimensiones que aquí se estudian (ver, por ejemplo, Figura 5.43, Figura 5.45 y Figura 5.94), esto es una sección radial de 20 cm \times 20 cm correspondiente a una muestra circular de 40 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Los campos de tensión horizontal de la Figura 5.20 muestran dos zonas con tensiones de tracción suficientes como para producir agrietamiento: la punta de la grieta y las esquinas inferiores derecha e izquierda. Las tensiones de tracción en la punta de la grieta serán las responsables de su propagación a lo largo del proceso. Como se ve en los análisis esta tracción es más acusada a medida que la grieta es más profunda lo cual hace pensar que una vez producida una grieta en la zona media de la superficie de una bandeja circular esta se propagará hasta alcanzar probablemente el fondo de la muestra. De hecho este tipo de comportamiento se ha observado en más de una ocasión en el laboratorio durante la auscultación con GPR en los ensayos de secado rápido y de ciclos (ver Capítulo 3 Análisis Experimental).

Como puede verse, el efecto de la grieta central consiste en la reducción de la deformación en general y del arqueado en particular. Esto concuerda bien con los ensayos de laboratorio donde se observa que cuando no hay agrietamiento el arqueado es considerable (Nahlawi & Kodikara, 2006) y en cambio cuando hay agrietamiento el arqueado es apenas medible (Lakshmikantha, 2009). También cabe mencionar que el arqueado será más o menos pronunciado según las características particulares del suelo en estudio, en particular su plasticidad parece ser determinante, como se ha podido comprobar con la arcilla de Werribee (Nahlawi & Kodikara, 2002) que presenta un arqueado muy pronunciado frente al modesto arqueado de la arcilla de Barcelona: la arcilla de Werribee tiene un IP = 101% frente al IP = 16% de la arcilla de Barcelona.

En la Figura 5.21 se muestran el resumen de los resultados de las cinco simulaciones para las distintas longitudes de grietas. En la Figura 5.21a se ve la variación del grado de saturación, del contenido volumétrico de humedad y de la permeabilidad relativa en un nodo de referencia señalado en la columna izquierda de la Figura 5.20 (marca blanca). Se comparan los valores para la grieta de 1 cm y la grieta de 19 cm. Evidentemente, cuanto mayor es la superficie sometida a la condición de contorno en succión, mayor es la variación de estos parámetros. En un ensayo real esta evolución será menos acusada debido a que las grietas evolucionan con el tiempo y no están presentes desde el inicio como se ha supuesto aquí. Sin embargo, debido a que el agrieta-

miento se produce desde muy temprano estas simulaciones tienen validez. En la Figura 5.21b se presenta la evolución de la succión en el punto de referencia blanco. Por su cercanía a la grieta, la influencia de la grieta central es evidente y lógica. A mayor longitud mayor es la influencia y el secado en las inmediaciones del punto en análisis.

Cuanto mayor es la grieta, mayor es la superficie expuesta a la condición de contorno en succión. En la geometría estudiada en este apartado, al progresar la grieta, el suelo se divide en dos bloques en los cuales la succión aplicada es mayor que en la misma sección sin grieta. La grieta central produce un aumento más rápido de la rigidez en cada bloque, debido a la mayor superficie sometida a succión, reduciendo así la tendencia a la deformación por arqueado de cada bloque, como se ve en la simulación para distintas longitudes de grieta. Con este análisis se observa que el efecto de las grietas en el proceso de desecación es muy importante. La arcilla es un material que cambia su rigidez con la succión. Estos cambios, sumados a los cambios de geometría que producen las grietas, condicionan el comportamiento global del conjunto cambiando por completo la configuración final deformada de la muestra.

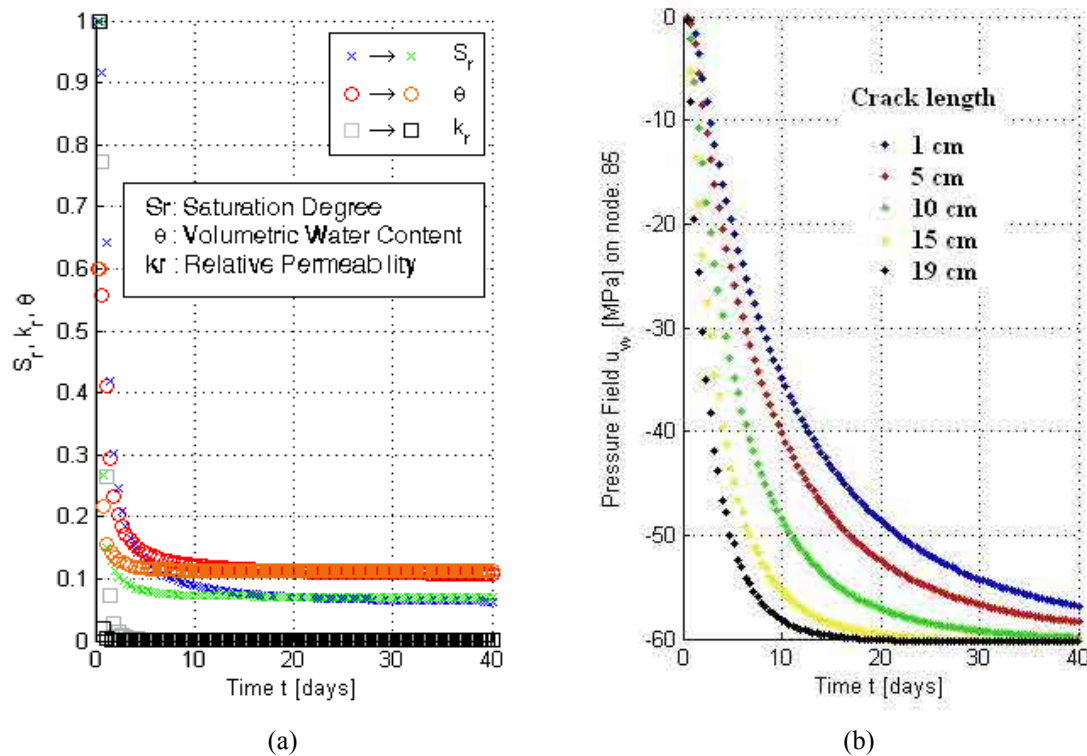


Figura 5.21 – Influencia de la profundidad de la grieta: (a) Influencia del tamaño de la grieta en: grado de saturación S_r , contenido volumétrico de agua θ y permeabilidad relativa k_r ; (b) Influencia del tamaño de la grieta en la variación de la succión en el nodo de referencia

5.3.2. Efecto de las Grietas Laterales en el Contacto con la Bandeja

En el apartado anterior se ha visto la influencia de una grieta central presente durante la desecación. En este apartado se estudia la influencia de una grieta lateral en el contacto con la bandeja contenedora de suelo. Este caso resulta interesante puesto que en todos los casos reales las primeras grietas que se forman son precisamente en el contacto con la bandeja. La influencia de las características de la adherencia entre el suelo y la bandeja no ha sido estudiada aún. En este apartado se hace referencia a los esquemas CC02-PC01, CC09-PC02 y CC08-PC04 de la Figura 5.8.

En este apartado, se presenta la simulación de la sección radial de 20 cm \times 10 cm correspondiente a bandejas de suelo de 40 cm de diámetro y 10 cm de altura (Figura 5.22), considerando estado de deformación plana.

La primera simulación (Figura 5.23a y b) no presenta grieta alguna y representa el inicio del proceso de secado. La segunda simulación incluye una grieta en todo el contacto con la pared derecha de la bandeja (Figura 5.23c y d); ésta suele ser en la mayoría de los casos la primera grieta en producirse. Finalmente, la tercera simulación incluye una grieta que abarca no solo la pared derecha sino 5 cm entre el contacto del suelo y el fondo de la bandeja (Figura 5.23e y f). En los ensayos de laboratorio (Lakshmikantha, 2009) se ha podido comprobar que por efecto de arqueado las muestras de suelo se deforman exponiendo parcialmente la superficie inferior al contacto con el ambiente lo cual, como se verá, tiene consecuencias en la deformación.

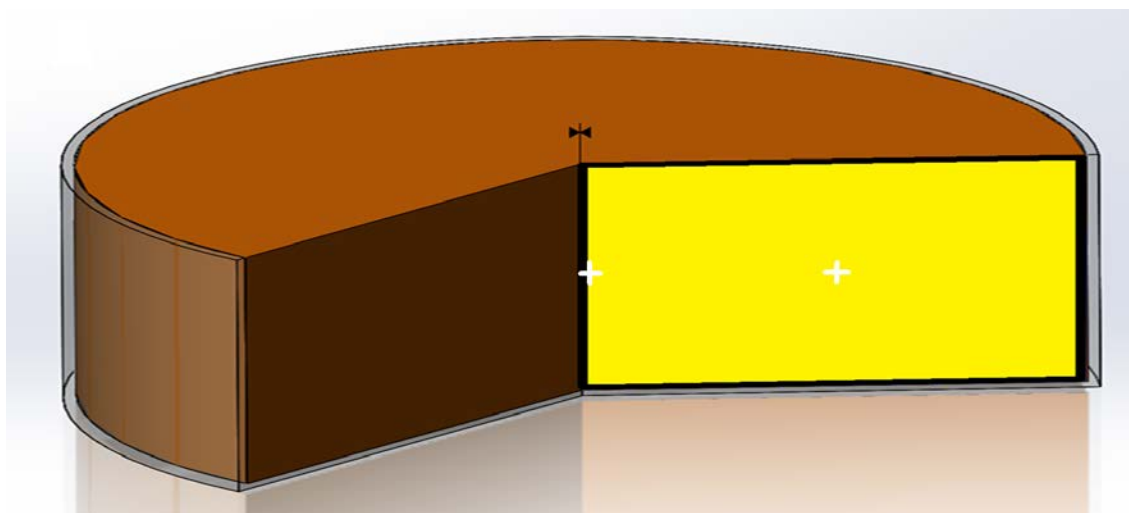


Figura 5.22 – Muestra cilíndrica de suelo de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura. Sección de 20 cm \times 10 cm (en amarillo) sobre la que se analiza numéricamente el efecto de las grietas laterales en la desecación de suelos. Los puntos de referencia usados para el análisis se indican en blanco.

Las simulaciones se realizan para un período de desecación de 40 días. En las Figura 5.23b, d y f se puede ver la evolución de la succión en dos puntos de referencia, uno en el centro de la sección y otro en el extremo izquierdo a media altura (pertenece al eje de la muestra) indicados en las Figura 5.22 y 5.23.

En el primer caso sin grieta (esquema CC02-PC01, Figura 5.23a) los nodos están a la misma altura y, por simetría, la evolución en ambos puntos de la succión es prácticamente la misma. La leve diferencia se debe sólo a la discretización del problema mediante elementos finitos de primer orden. Como ya se indicó anteriormente, este esquema representa más bien un comportamiento unidimensional. Hay que tener en cuenta, además, que este esquema supone que no existe fricción entre la muestra de suelo y la pared derecha de la bandeja, lo cual evita la aparición de tracciones capaces de producir agrietamiento. Se ha elegido este esquema para evitar distorsionar el campo de succión y porque corresponde a lo que sucede en la primera fase de desecación sin agrietamiento que es típica en el laboratorio, ya que siempre existe una **primera etapa sin grietas** que dura usualmente entre 1 y 8 días en las muestras cilíndricas de 80/40 cm de diámetro y 20/10 cm de altura según se ha comprobado en ensayos anteriores (Lakshmikantha, 2009) y en los realizados para esta tesis.

En el segundo caso, esquema CC09-PC02 (Figura 5.23c), se observa que existe diferencia entre la evolución de la succión debido a la existencia de una grieta a la derecha de la muestra. Esta grieta tiene asignada una condición de contorno en succión en el contorno superior y lateral derecho que contribuye al secado. Por esta razón la desecación avanza más deprisa en el punto más cercano al extremo derecho. También es de resaltar que existe diferencia respecto del caso anterior, sin grieta, y que se observa la influencia de la diferencia en condiciones de contorno en la simulación o bien la presencia de una grieta en la muestra de suelo. Se observa que la influencia de la succión aplicada sobre una grieta de 10 cm es sensible sobre todo si la grieta aparece pronto durante el proceso de desecación, lo cual ocurre a menudo. En la simulación se considera que la grieta existe desde el principio. Aunque este ejercicio pueda parecer trivial, es interesante puesto que en muchos casos las grietas en el contacto con la bandeja se producen en los primeros momentos del ensayo, estando presente en un porcentaje elevado de la duración total del mismo. Por supuesto, si se modela la evolución de la grieta se obtendrán resultados más realistas, cosa que se hace en apartados siguientes. Se define así una **segunda etapa** en los ensayos realizados en el laboratorio que consiste en la desecación de la **muestra con una grieta perimetral** propagada hasta el fondo de la bandeja contenedora y que es habitual en los ensayos en las muestras cilíndricas de 80/40 cm de diámetro y 20/10 cm de altura.

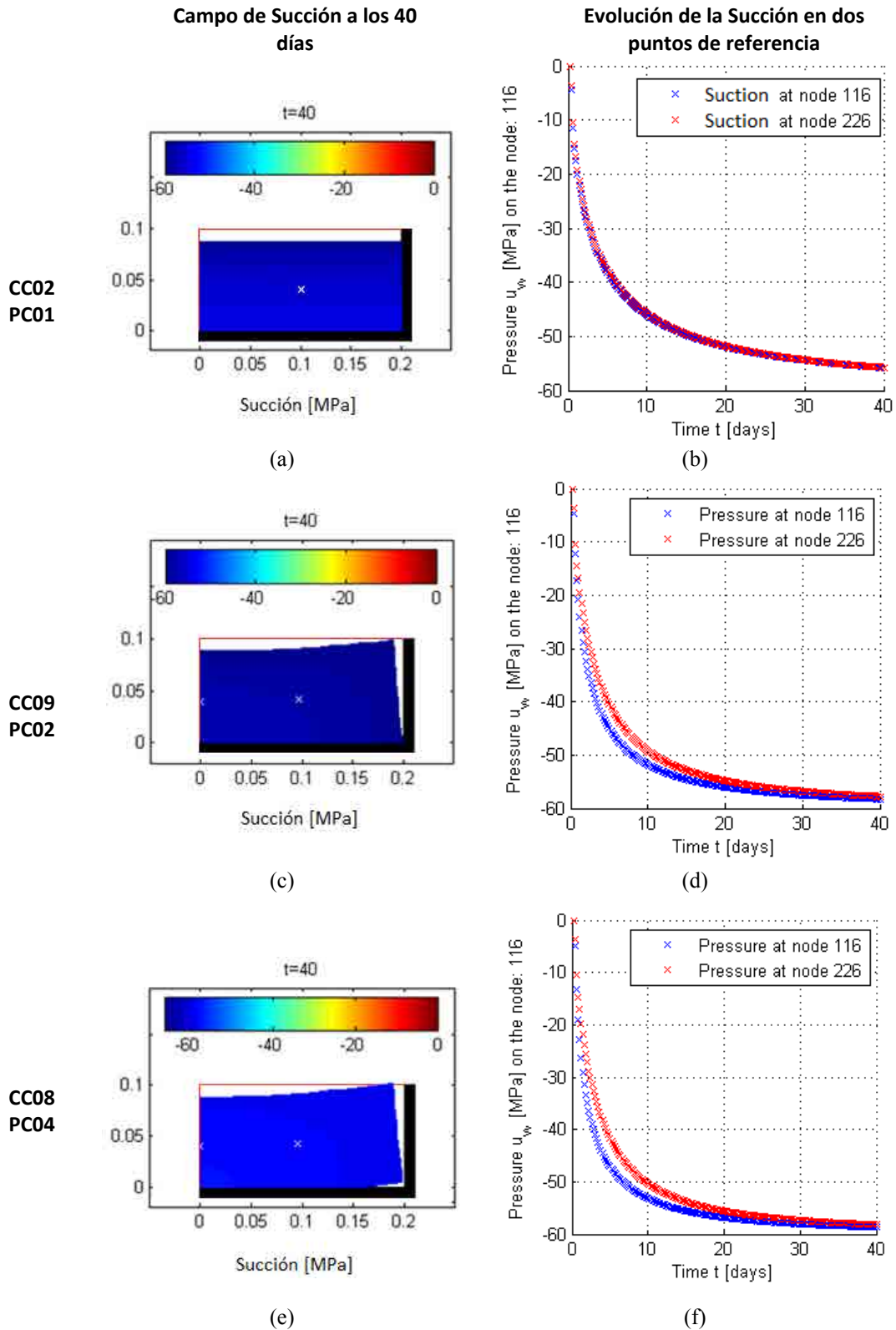


Figura 5.23 – Comparación de la evolución de la succión para tres casos de desecación, esquemas: CC02-PC01, CC09-PC02 y CC08-PC04. El nodo 116 es el nodo central en la figura (coordenadas: 0.1 m, 0.05 m), línea azul, el nodo 226 es el nodo en medio de la línea vertical izquierda de la sección radial en estudio, línea roja (coordenadas: 0, 0.05).

Con el tercer caso, esquema CC08-PC04 (Figura 5.23e), pasa algo similar. La evolución de la presión de poros es mayor aún. En este caso, debido a las condiciones de contorno combinadas con la grieta horizontal, se observa un efecto de arqueado hacia arriba que ha sido típico en los ensayos realizados por Lakshmikantha (2009) en bandejas de estas dimensiones.

Este mecanismo de arqueado es fundamental para justificar las grietas radiales que se producen por debajo de muestras de 80/40 cm de diámetro por 20/10 cm de altura, estudiadas por Lakshmikantha (2009), (Figura 5.42 y Figura 5.44). Este efecto se produce en tres dimensiones en la bandeja real y por lo tanto también puede explicar la formación de las grietas curvas en el fondo de la muestra observadas en los mencionados ensayos. Cabe recordar que en los ensayos de muestras de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura, no se producen grietas en la cara visible superior de la muestra, cuestión que se justifica con el comportamiento observado en las simulaciones presentadas en este apartado. Se define así, una **tercera etapa** en la desecación de las muestras cilíndricas de 80/40 cm de diámetro y 20/10 cm de altura, que consiste en el **arqueado de la muestra por efecto de la desecación**.

El campo de succión de los tres casos estudiados corresponde a 40 días de simulación de desecación. Tal y como se ha visto en el laboratorio, 40 días son suficientes para lograr el equilibrio con el ambiente en muestras de estas dimensiones (las muestras de 10 cm de altura alcanzaron el equilibrio a los 40, 33 y 37 días, como se verá más adelante en este Capítulo). Esto indica que las simulaciones pueden ser calibradas para que evolucionen, en el tiempo, de la misma manera que lo hace el experimento en el laboratorio.

En la Figura 5.24 y Figura 5.25 se presentan más resultados respecto de los tres casos presentados arriba. Más allá de las diferencias evidentes debido a la presencia de las grietas, el modelo muestra que la evolución de la desecación es muy rápida en los primeros días de la simulación y luego decrece rápidamente. El volumen de la muestra, Figura 5.24a, c y e, se reduce de 0.02 m^3 a casi 0.0175 m^3 cuando se aplica succión sólo en el borde superior. La reducción de volumen es de 0.02 m^3 a poco menos de 0.018 m^3 cuando se impone succión en el borde superior, borde derecho y 5 cm del fondo de la muestra. Esto es debido a que la rigidez del suelo es mayor cuanto más rápido evoluciona la desecación porque hay un mayor número de contornos donde se impone la succión. En la Figura 5.24b, d y e, se presenta la evolución de la porosidad en los dos puntos de referencia para los tres casos. La porosidad disminuye más cuanto más agresiva es la condición de contorno en succión en los puntos analizados. Sin embargo, la retracción de la muestra disminuye. Esto indica una variación local, distinta de la variación global, cuando cambian las condiciones de contorno en succión.

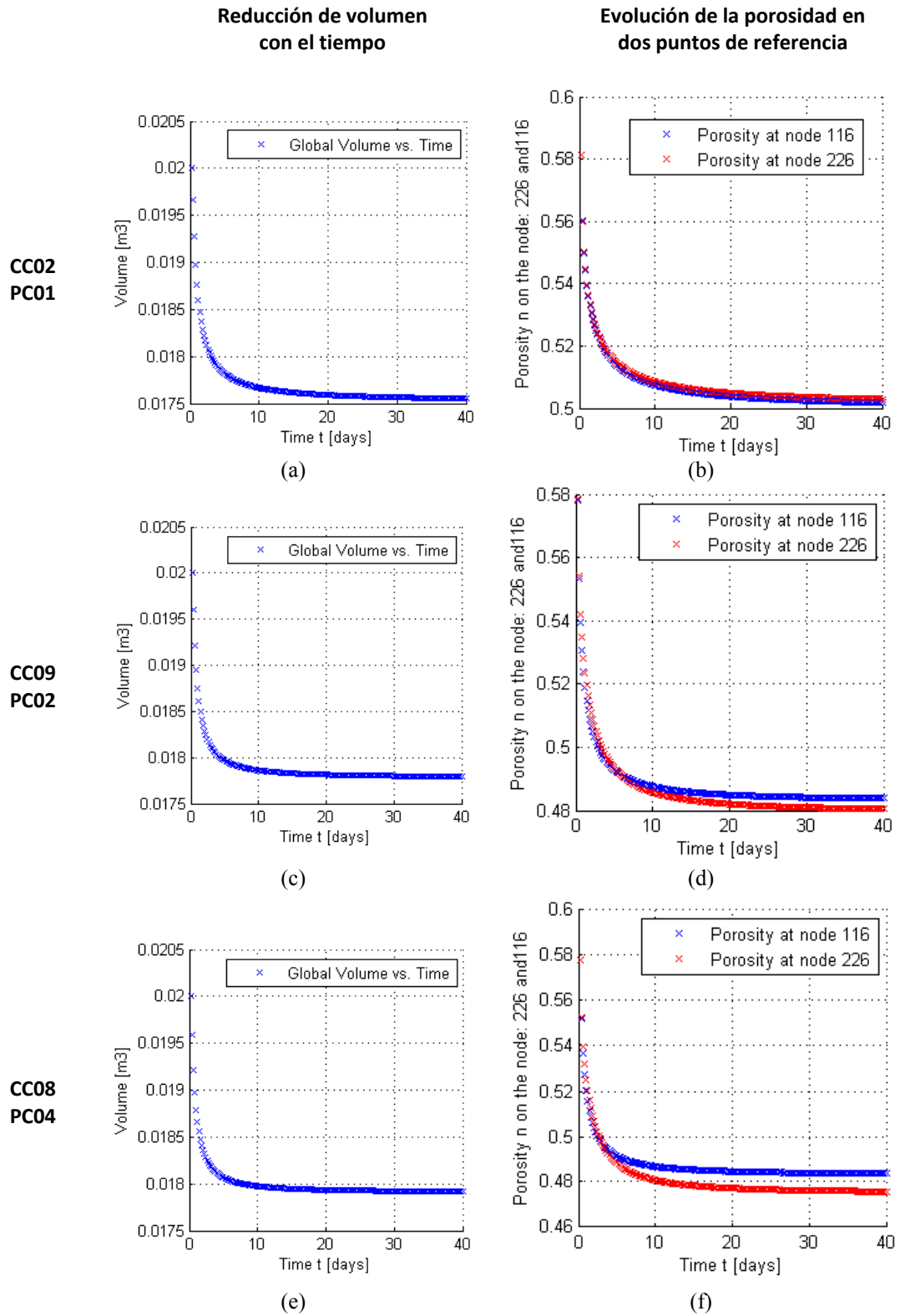


Figura 5.24 – Efecto de las grietas laterales:

a), c) y e): Evolución del volumen de la muestra de suelo; b), d) y f): Evolución de la porosidad en dos puntos de referencia.

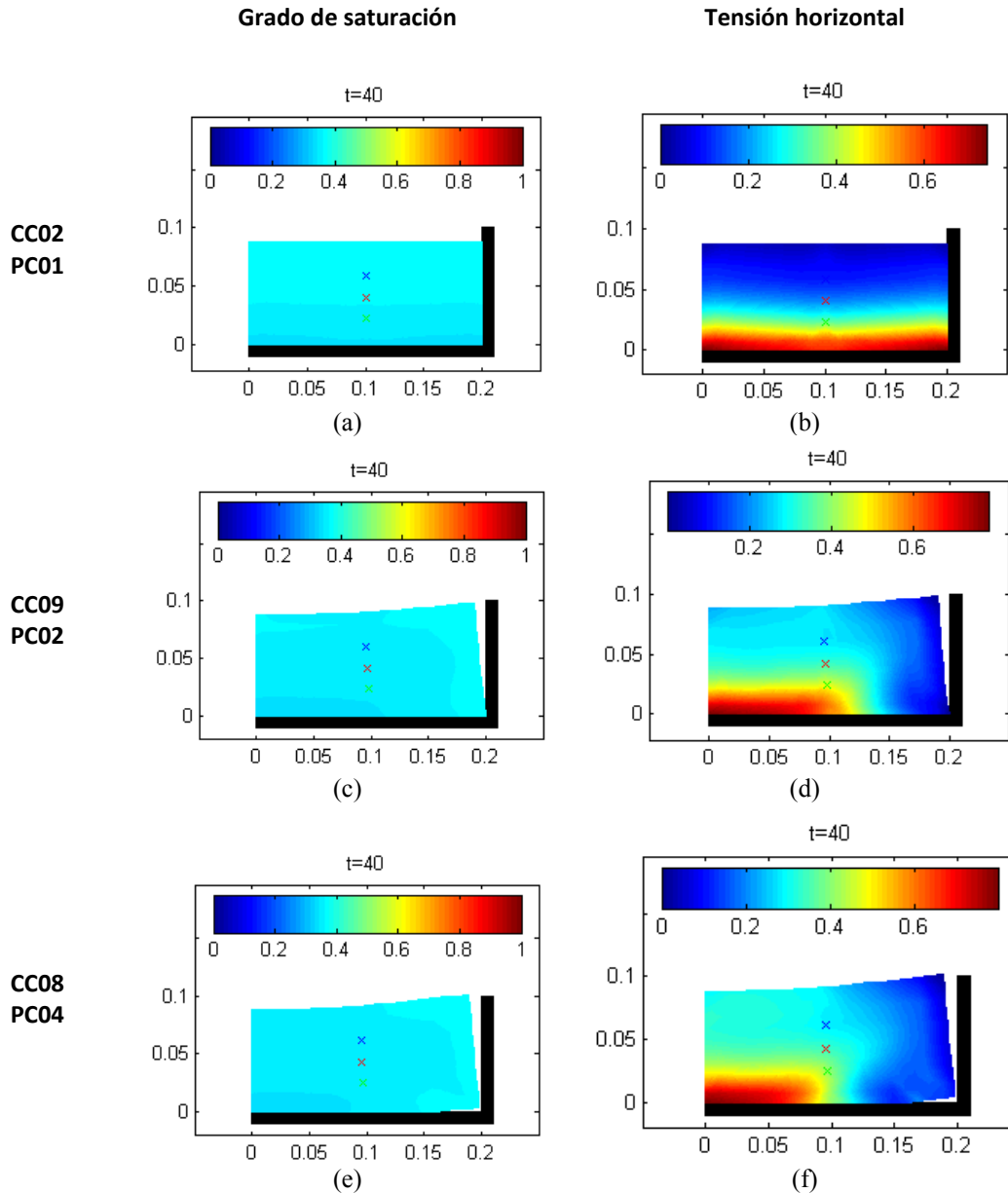


Figura 5.25 – Grado de saturación (columna izquierda) y tensión horizontal (columna derecha) a 40 días de desecación para los esquemas CC02-PC01, CC01-PC02 y CC08-PC04.

Se observa que hay una primera etapa con evolución rápida de la retracción los primeros 10 días, la porosidad se redujo de 0.58 a menos de 0.51, a partir de allí la reducción es mucho menor. Se simulan por lo tanto las dos etapas principales durante el proceso: la primera de retracción importante con el suelo prácticamente saturado y la segunda con apenas retracción con el suelo no saturado.

En la Figura 5.25a, c y e, se presentan el grado de saturación de la muestra al final de los 40 días de secado. Se puede observar que el grado de saturación no es uniforme aún después de 40 días.

Esto afecta a la evolución de las variables que dependen del grado de saturación como son la rigidez, la resistencia a tracción, etc., quedando en evidencia la complejidad de interacción entre las variables del modelo. En la Figura 5.25b, d y f, se presentan las tensiones horizontales al final de la simulación.

En la Figura 5.26 se presentan más resultados del primer caso analizado con condiciones de contorno correspondientes al esquema CC02-PC01. La sección radial analizada tiene una dimensión inicial de 20 cm de ancho por 10 cm de altura.

En la Figura 5.26a, se muestran las tensiones horizontales y verticales en los puntos de referencia definidos arriba. Se observa que la tensión es mayor a mayor profundidad y que aumenta progresivamente hasta un valor asintótico lo cual indica que el proceso llega prácticamente a su equilibrio a los 40 días. Las tensiones verticales son mayores que las horizontales.

En la Figura 5.26b se muestran los desplazamientos en los puntos de referencia. Los desplazamientos horizontales son nulos y los verticales son mayores cuanto más cercano a la superficie esté el punto de referencia.

En las Figura 5.27 y Figura 5.28 se presentan la evolución de las tensiones y desplazamientos para los esquemas CC09-PC02 con grieta lateral vertical y CC08-PC04 con grieta lateral y horizontal en el fondo de la muestra. El comportamiento es similar al caso sin grieta con la salvedad de que las variables evolucionan más deprisa debido al mayor porcentaje de contorno donde se impone la succión.

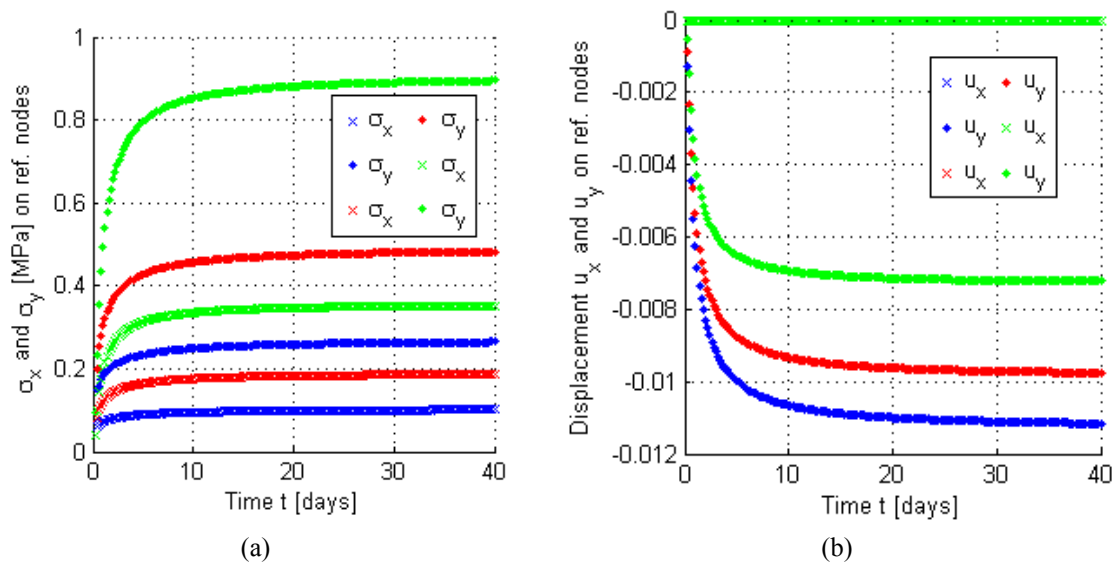


Figura 5.26 – Resultados de la simulación para el caso sin grietas. Esquema CC02-PC01: a) Evolución de las tensiones con el tiempo; b) Evolución de los desplazamientos.

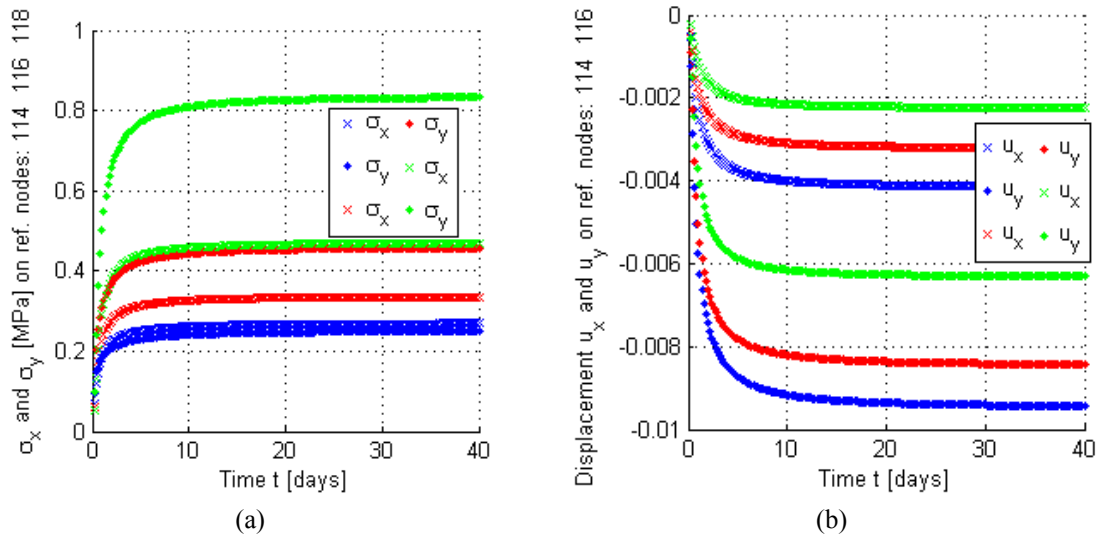


Figura 5.27 – Resultados de la simulación del caso con grieta vertical en contacto con la pared de la bandeja. Esquema CC09-PC02: a) evolución de las tensiones con el tiempo; b) evolución de los desplazamientos.

Nuevamente, se comprueba que existe correspondencia con lo que sucede en el laboratorio. Estas simulaciones tienen como objetivo mostrar las posibilidades de análisis del código y son cualitativas. Como se ha visto en éste y en el apartado anterior las grietas, en su interacción con el proceso hidromecánico de desecación, tienen una influencia crítica en los parámetros mecánicos e hidráulicos del modelo, además de una influencia en el comportamiento mecánico de retracción y deformación que justifican lo que sucede en el laboratorio y los mecanismos supuestos para el estudio del agrietamiento.

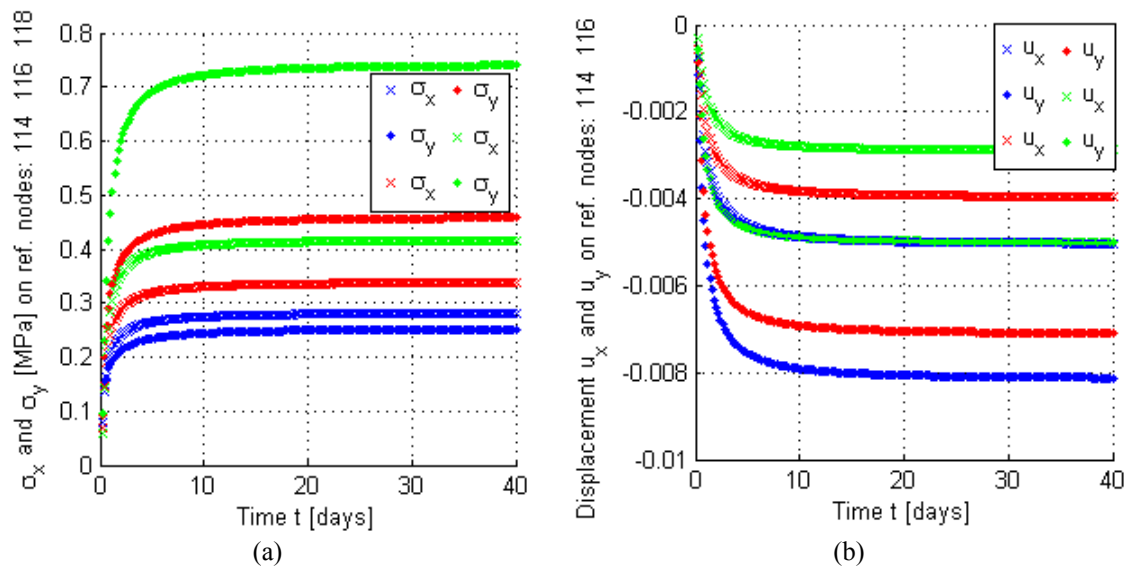


Figura 5.28 – Resultado de la simulación del caso con grieta vertical en contacto con la pared de la bandeja y horizontal en contacto con el fondo de la bandeja. Esquema CC08-PC04: a) evolución de las tensiones con el tiempo; b) evolución de los desplazamientos.

5.3.3. Conclusiones sobre el Efecto de las Grietas en la Dsecación de Suelos Arcillosos

La posibilidad de reproducir el comportamiento hidromecánico de la muestra de suelo con los análisis numéricos demuestra que el cambio en las condiciones de contorno durante el proceso es la principal causa de los agrietamientos y retracción de la muestra de suelo. Además, el análisis numérico ha permitido definir cuáles son las condiciones más apropiadas y sus cambios a lo largo del proceso para poder simular la desecación con mayor precisión.

Es evidente que la formación de grietas en la geometría de la muestra de suelo modifica las condiciones de contorno del problema, liberando coacciones y exponiendo al ambiente nuevos contornos. El modelo predice que estos cambios producirán efectos importantes en el comportamiento hidromecánico de la sección estudiada en cuanto a la desecación y a la retracción del suelo. Se generan variaciones en la evolución de las variables hidromecánicas del problema que a su vez modifican el estado de tensiones, los cuales son responsables de alcanzar las condiciones necesarias para el desarrollo de nuevas grietas.

Las grietas estudiadas en los apartados precedentes son grietas primarias porque son las primeras en producirse. En los ensayos, también se producen grietas secundarias, terciarias, etc., cuya configuración depende de las grietas primarias y de las condiciones de contorno iniciales del problema. Las grietas, además, condicionan el arqueo del suelo que es también un mecanismo de fisuración: las grietas observadas por debajo de las muestras ensayadas en laboratorio pueden ser explicadas por el fenómeno de arqueo. De esta forma, la interacción que existe entre el agrietamiento y el problema hidromecánico es muy importante y tiene consecuencias mucho más profundas de lo que se puede anticipar a priori en este tipo de problemas.

5.4. Estudio de Ensayos de Dsecación de Suelos Arcillosos en Laboratorio

En este apartado se presentan los cálculos realizados con el fin de validar el modelo para reproducir resultados obtenidos en ensayos de laboratorio.

El primer ensayo analizado estudia el fenómeno de arqueo que ya fue estudiado numéricamente por sus autores (Nahlawi & Kodikara, 2002; Kodikara, et al., 2004). En esta sección se analizan los resultados experimentales y numéricos presentados en la literatura y se simulan las tres etapas que se han identificado durante el proceso en el laboratorio.

En segundo lugar se comparan los ensayos de laboratorio en bandejas de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura ejecutados por (Lakshmikantha, 2009), con el ensayo de secado rápido del mismo tamaño realizado para esta tesis. Posteriormente, se realiza un análisis numérico de estos ensayos.

Seguidamente se comparan los ensayos de (Lakshmikantha, 2009) con muestras de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura con el ensayo realizado en el contexto de esta tesis en muestra de igual tamaño. Estos ensayos se simulan numéricamente y se analizan los resultados obtenidos.

Por último se describen los resultados del ensayo en muestra de 80 cm de diámetro \times 20 cm de altura ejecutado por (Lakshmikantha, 2009) y se simula numéricamente incluyendo el inicio y la propagación de una grieta lateral.

5.4.1. Arqueo en Muestras de Pequeño Espesor

La desecación de suelos arcillosos está asociada a la formación de grietas poligonales y al arqueo como se ha explicado en la introducción de esta tesis y publicado en la literatura (Konrad & Ayad (1997a) y Nahlawi & Kodikara (2002). El arqueo ha sido detectado además en la tesis de (Lakshmikantha, 2009) y tiene consecuencias en el agrietamiento de muestras de suelo cilíndricas desde la superficie inferior hacia arriba. Este fenómeno es relevante no solo en suelos sometidos a desecación, sino también en otros materiales porosos como el papel, placas de yeso, madera aglomerada, pavimentos, etc. Este comportamiento hidromecánico se debe a la no linealidad material y geométrica que presenta el proceso de secado y humedecimiento.

En este apartado se presentan los resultados experimentales y simulaciones numéricas realizadas en la literatura mencionada y se utilizan para contrastar los resultados obtenidos con el código de esta tesis, con el cual se analiza el proceso de desecación con arqueo y se propone una explicación del fenómeno basada en el estudio previo realizado en los apartados anteriores de este

Capítulo respecto de la influencia de las condiciones de contorno y de las propiedades del suelo que cambian con el grado de saturación y la succión.

5.4.1.1. Experimento de Laboratorio con Muestras Delgadas

En los ensayos de desecación realizados por (Nahlawi & Kodikara, 2002), se utilizaron muestras de arcilla de Werribee de alta plasticidad ($I_p = 101\%$) en moldes lubricados con vaselina de 25 cm de largo por 2.5 cm de ancho y 1.25 cm de altura. Los ensayos se realizaron en una cámara ambiental con temperatura y humedad relativa del ambiente controladas.

En la Figura 5.29a se ve la contracción isótropa durante las primeras horas del ensayo. En una etapa intermedia se produce arqueado de los extremos hacia arriba (cóncavo). Al final del ensayo (Figura 5.29b), se observa arqueado convexo.

Detalles de este suelo se pueden ver en la Tabla 2.2 del Capítulo 2 Estado del Arte, de esta tesis. En la

Tabla 5.2 se resumen las condiciones de los ensayos (Nahlawi & Kodikara, 2002). En la Figura 5.30 se muestran los resultados de dos de estos ensayos (curvas de secado de los ensayos 1 y 3). En estas curvas se observa que al principio del ensayo la humedad en la superficie superior, w_t , es menor que en la superficie inferior, w_l , de la muestra, indicando mayor desecación en la cara superior. Posteriormente, una vez avanza el ensayo, esta diferencia desaparece, lo cual produce el arqueado convexo debido a que la zona inferior de la muestra sería más blanda por estar más húmeda.

5.4.1.2. Explicación Teórica de Kodikara

Se supone que el efecto de la desecación es isótropo y que la matriz de suelo tiene un comportamiento no lineal. La relación entre los incrementos de retracción, las tensiones que esta retracción produce y la succión se expresa en la ecuación (5.1).

$$\Delta\varepsilon_{sh} = \frac{(1 - 2\nu)}{E} \Delta\sigma_{sh} + \frac{\Delta\psi}{H} \quad (5.1)$$

Tabla 5.2 – Condiciones de los ensayos de arqueado en (Kodikara, et al., 2004)

Ensayo	Temperatura °C	Humedad relativa (%)	Humedad inicial (%)
Ensayo Piloto	16	50	127
Ensayo 1	16	50	136.2
Ensayo 2	18	40	127
Ensayo 3	18	40	127

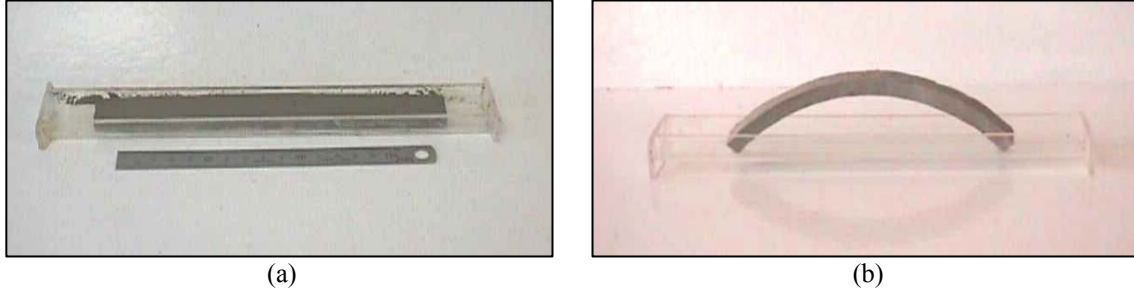


Figura 5.29 – Arcilla de Werribee: a) *contracción inicial isótropa*; b) *arqueado final a las 65.5 horas*. (Nahlawi & Kodikara, 2002)

Donde E es el módulo de elasticidad tangente, ν es el coeficiente de Poisson, $\Delta\psi$ es el incremento de succión, H es el módulo de succión tangente y la presión de aire se supone igual a cero. Al inicio del ensayo se supone que $\Delta\varepsilon_{sh} = 0$. Entonces:

$$\Delta\sigma_{sh} = -\frac{1}{(1-2\nu)}\frac{E}{H}\Delta\psi \quad (5.2)$$

El incremento de retracción viene dado por el aumento de succión:

$$\Delta\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta\psi}{H} \quad (5.3)$$

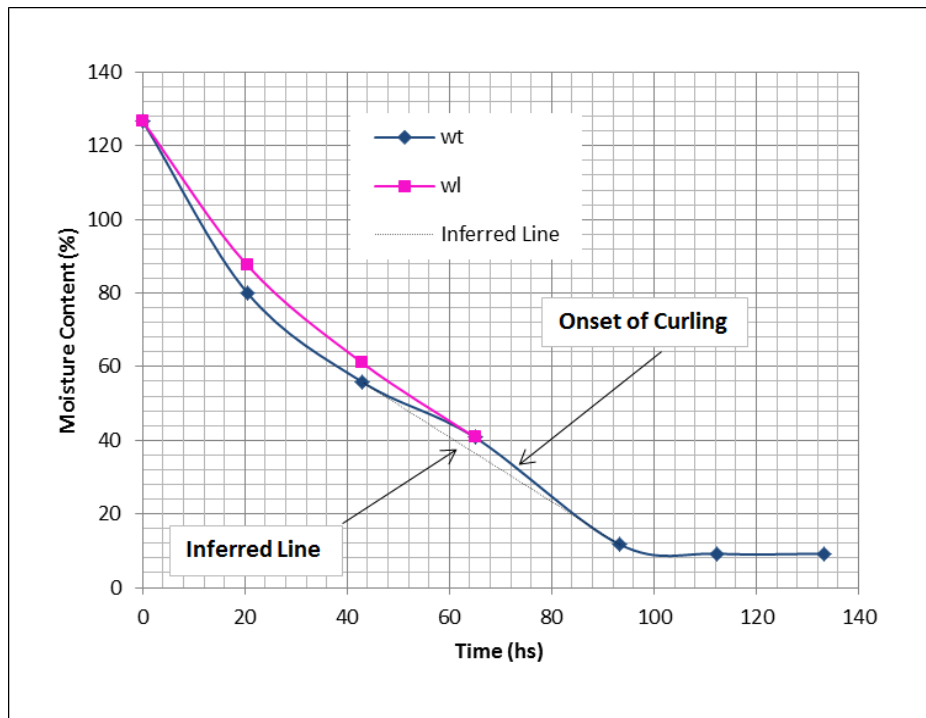
El incremento de la tensión debida a la retracción será:

$$\Delta\sigma_{sh} = -\frac{E}{(1-2\nu)}\Delta\varepsilon_{sh} \quad (5.4)$$

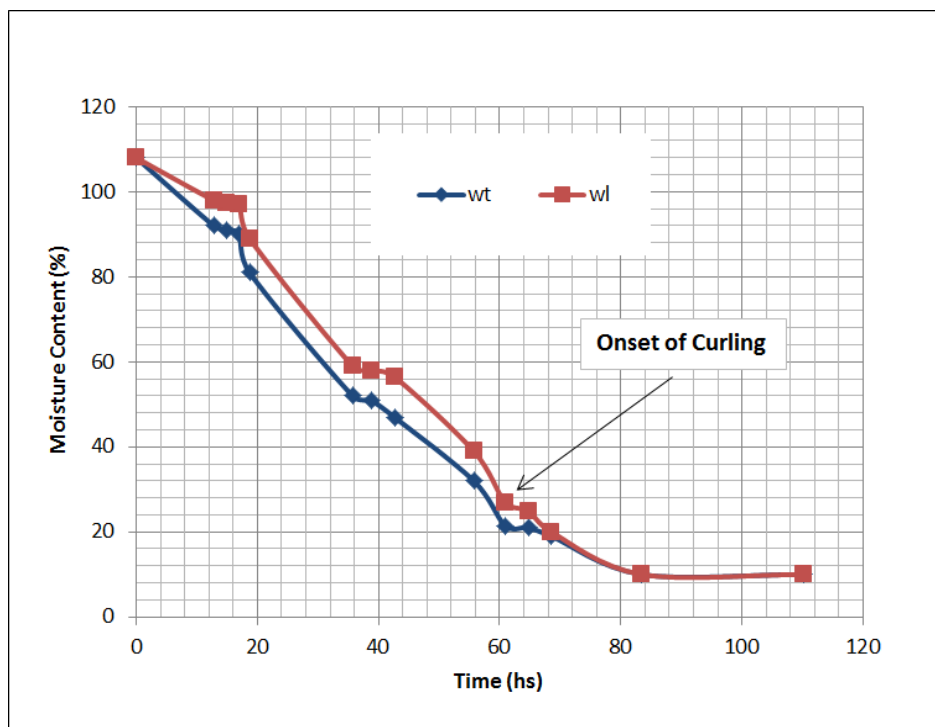
Según Kodikara esta tensión es de tracción y con el tiempo se redistribuye a tensiones de compresión, lo cual produce en definitiva la retracción del suelo.

Kodikara dice que en los primeros momentos, debido a que el suelo es blando, éste se deforma isótopamente a pesar de que es más rígido arriba, donde hay más succión, que abajo, puesto que las diferencias en rigidez son pequeñas. El arqueado convexo se da porque a esa altura el suelo es rígido (más arriba que abajo) y entonces se deforma más abajo que arriba aunque las tensiones son más altas arriba que abajo.

Si hubiera coacciones Kodikara dice que esto impediría la relajación de tensiones y las tensiones de tracción producirían grietas como en los ensayos de (Nahlawi & Kodikara, 2006) realizados con la misma arcilla pero con contenedores que restringen la deformación. Información sobre estos ensayos se encuentran en el Estado del Arte de esta Tesis.

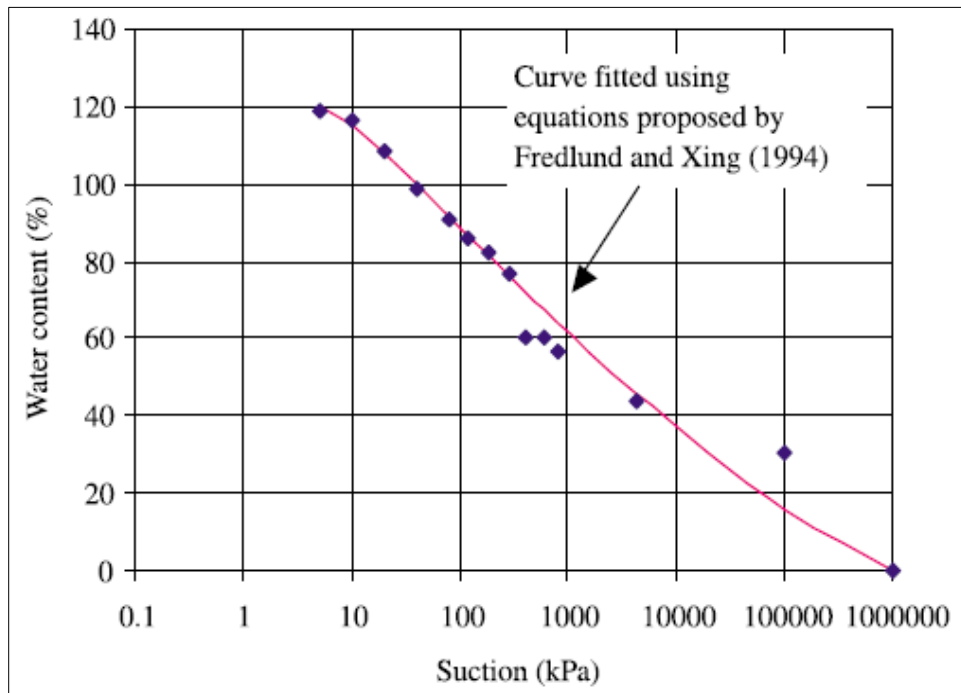


(a) Ensayo 1

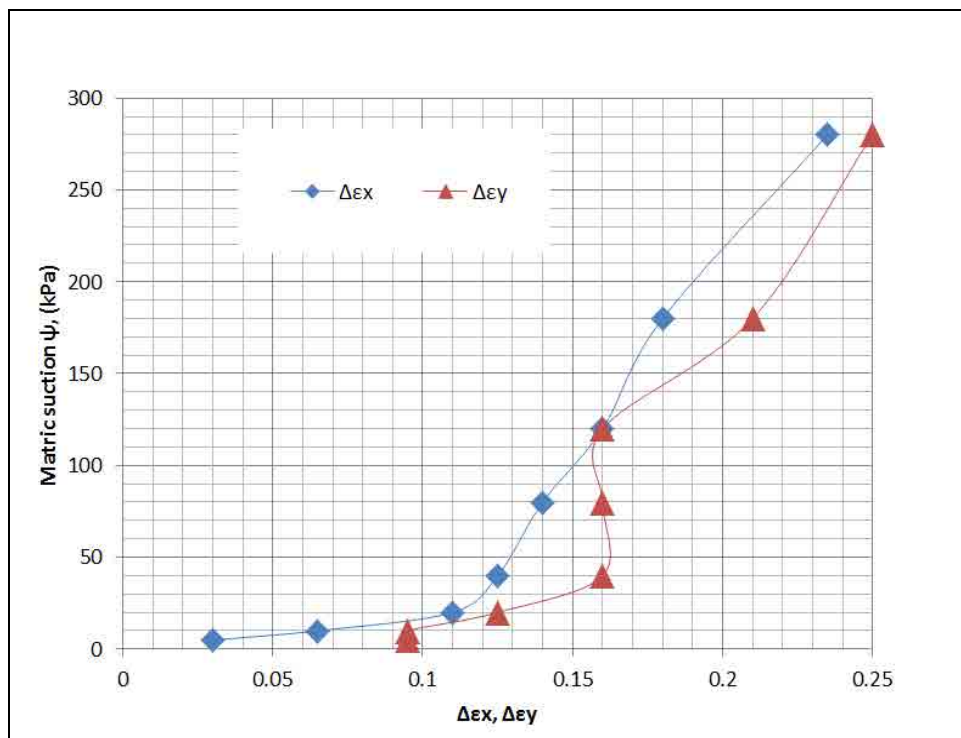


(b) Ensayo 3

Figura 5.30 – Curvas de secado de ensayos 1a y 3b de Nahlawi & Kodikara (2002). w_t es la humedad en la superficie superior de la muestra y w_l es la humedad en la superficie inferior de la muestra.



(a)



(b)

Figura 5.31 – Arcilla de Werribee: a) curva de retención para las muestras 1 y 2 (Kodikara, et al., 2004); b) succión matricial vs deformación (Nahlawi & Kodikara, 2002).

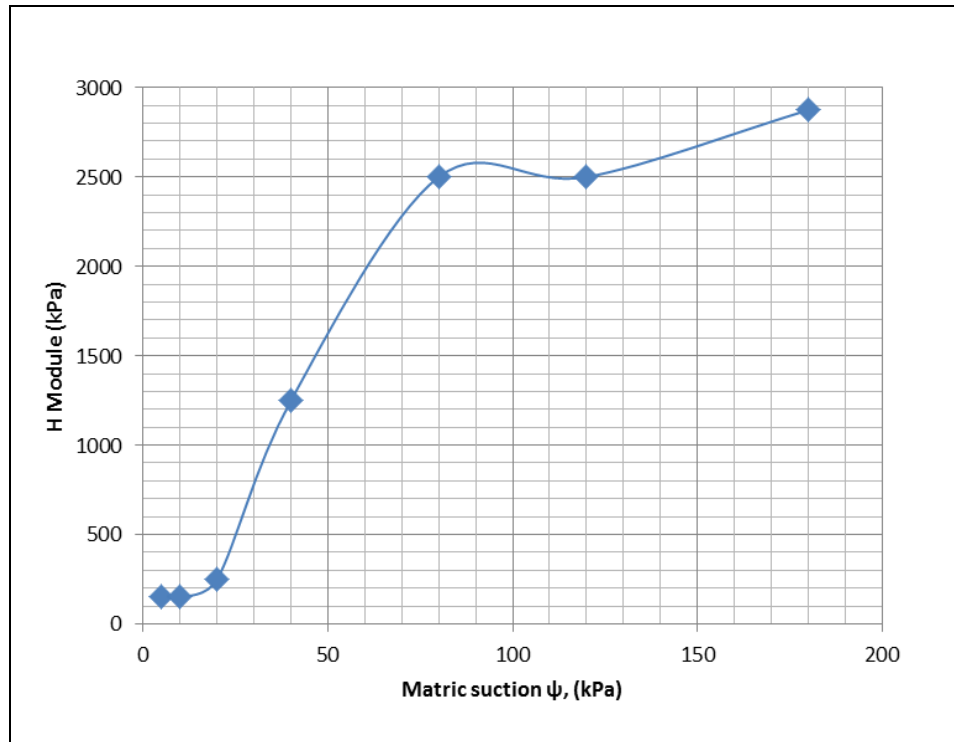


Figura 5.32 – Variación del módulo de succión, H , en función de la succión matricial (Nahlawi & Kodikara, 2002).

5.4.1.3. Simulación Numérica de Arqueo usando FLAC

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) es un código comercial basado en el método de las diferencias finitas que puede simular procesos en suelos y rocas. Se ha utilizado para simular el proceso de arqueo (Kodikara, et al., 2004). En dicho artículo se presenta una explicación teórica basada en la Mecánica de Suelos no Saturados. La simulación se llevó a cabo mediante un modelo elástico no lineal y grandes deformaciones, usando valores de las propiedades medidos en laboratorio. Se ha podido simular la retracción isotrópica de la arcilla de Werribee y el arqueo presentado durante el proceso de secado.

5.4.1.4. Propiedades del Suelo usado para Estudiar el Arqueo

En la Figura 5.31 se presentan la curva de retención de la arcilla de Werribee y la relación entre la succión matricial y la deformación. De ésta última se puede inferir que en este caso la contracción es isotrópica, puesto que ambas curvas son muy similares.

En la Figura 5.32 se muestra la variación del módulo de succión con la succión matricial de la arcilla de Werribee, lo cual deja constancia de dicha dependencia que debe ser tenida en cuenta. La arcilla comienza el proceso con un módulo de succión prácticamente nulo que luego va creciendo con el aumento de succión de forma no lineal.

5.4.1.5. Enfoque del Modelo de Kodikara

La evolución de la succión con el tiempo se basa en las mediciones que se hacen en el laboratorio (la medición de la humedad se hace en la mitad superior y mitad inferior de la muestra), suponiendo una distribución lineal de la succión en el espesor de la muestra.

Se simulan ensayos de arqueo por desecación con muestras de arcilla de Werribee sometidas a una temperatura constante de 18°C y una humedad relativa del 40%. El programa es mecánico y no incorpora el proceso hidráulico. Para simular el proceso observado en la Figura 5.30, la humedad se transforma en succión en la superficie superior e inferior de la muestra en función del tiempo, como se muestra en la Figura 5.34. Para hacer dicha transformación se utilizó la curva de retención y se dividió el proceso en siete incrementos de succión. Se configuró el programa para aplicar las tensiones calculadas con las ecuaciones (5.1) a (5.4).

En la Figura 5.35 se muestran los esquemas utilizados para la simulación con FLAC. La base azul se consideró rígida, las condiciones de contorno en desplazamientos fijaron un punto de la base y los desplazamientos horizontales del borde izquierdo que es un eje de simetría ya que se consideró solo la mitad de la muestra de suelo. El módulo de succión se calculó mediante la regresión $H = 24\psi^{0.92}$, como se ve en la Figura 5.33. El módulo de elasticidad es $E = H(1 - 2\nu)$. Se supuso un coeficiente de Poisson $\nu = 0.45$. El módulo al corte se ajustó al inicio de cada intervalo de carga aplicado.

5.4.1.6. Simulación Numérica con Código programado en MATLAB

Se ha utilizado el modelo de la presente Tesis para simular el proceso de secado con arqueo de (Nahlawi & Kodikara, 2002) simulando exclusivamente la muestra de suelo. Por lo tanto, no se ha analizado la interacción mecánica de la muestra con la superficie del contenedor en el sentido del problema de contacto. Solo se han establecido las condiciones de contorno en desplazamiento y succión necesarias para ejecutar el código.

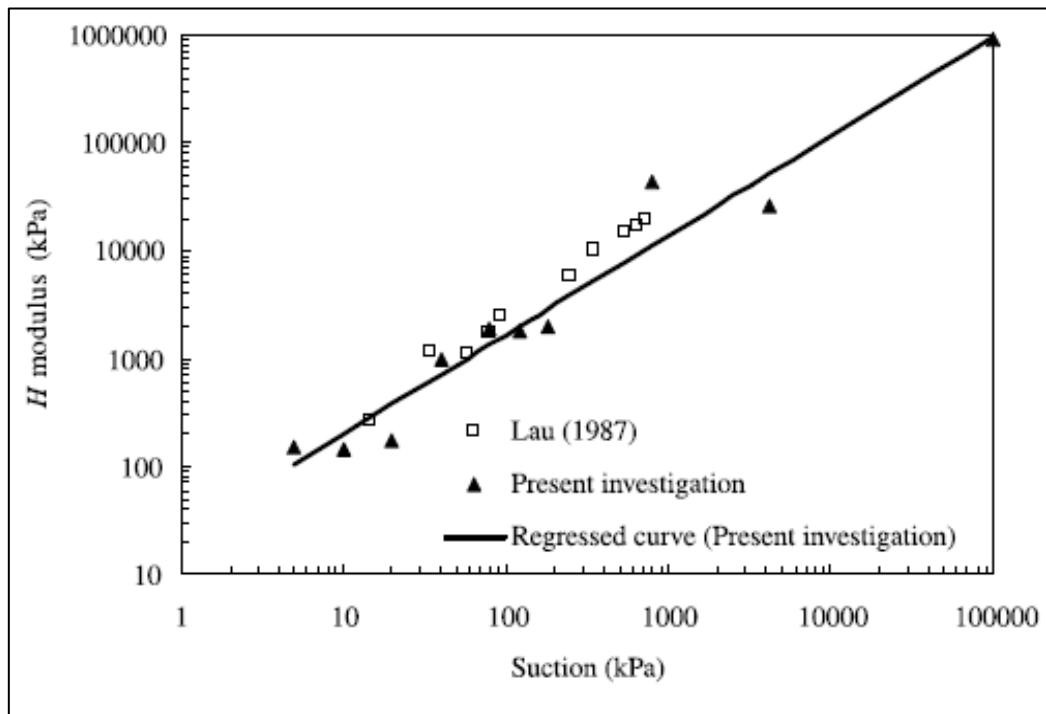


Figura 5.33 – Módulo de succión vs succión (Kodikara, et al., 2004).

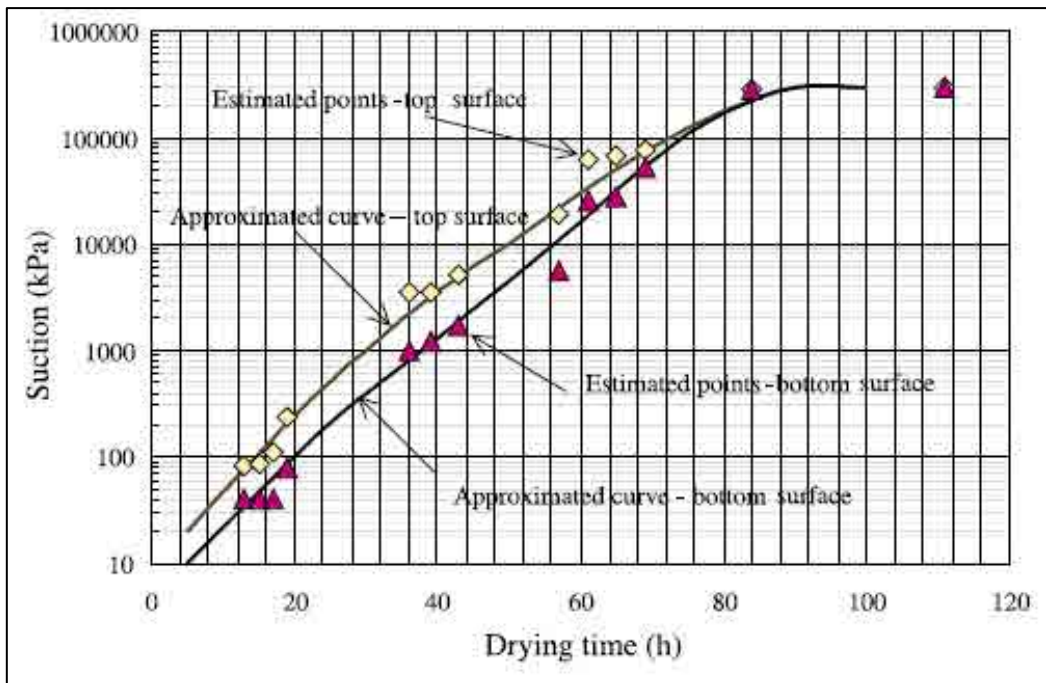


Figura 5.34 – Valores estimados de succión en las superficies superior e inferior de la muestra con 40% de humedad relativa y 18°C de temperatura (Kodikara, et al., 2004).

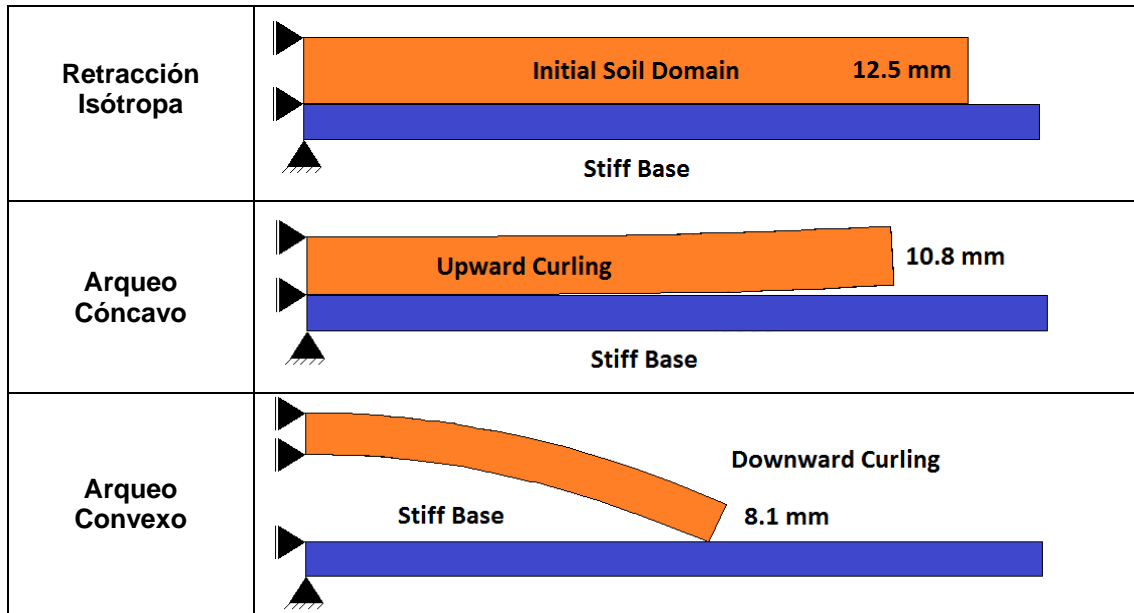


Figura 5.35 – Simulaciones usando el programa FLAC. *Espesores de la muestra en las principales etapas del proceso* (Kodikara, et al., 2004).

5.4.1.7. Enfoque del Modelo de esta Tesis

Como se ha presentado en el capítulo anterior, el modelo que propone esta tesis es hidromecánico. Por lo tanto, resuelve tanto el problema de flujo como el problema mecánico. Por este motivo, se puede decir que la aproximación es más completa que la propuesta por (Kodikara, et al., 2004) que es solo mecánica. La relación entre la deformación volumétrica (retracción, la reducción de volumen se considera de signo positivo), la tensión media neta y la succión es:

$$d\varepsilon_v = \frac{1}{K} dp' + \frac{1}{K^s} ds \quad (5.5)$$

Esta expresión es idéntica a la ecuación (5.2), donde $d\varepsilon_v = \Delta\varepsilon_{sh}$ es la retracción, $dp' = \Delta\sigma_{sh}$ es la tensión, $ds = \Delta\psi$ es el incremento de succión, $K^s = H$ es el módulo de succión y $K = E/(1 - 2\nu)$ es el módulo de elasticidad volumétrico. La diferencia es que estas propiedades se derivan de la superficie de estado del suelo y son módulos tangentes, que son función de la tensión neta y de la succión.

Módulo de deformación
volumétrica:

$$\frac{1}{K_t(p', s)} = \frac{(1 + e_0)(p'_0 + a_4)}{-a_1 - a_3 \ln \frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}} \quad (5.6)$$

$$\text{Módulo de deformación debido a succión:} \quad \frac{1}{K_t^s(p', s)} = \frac{(1 + e_0)(s + p_{ref})}{-a_2 - a_3 \ln(p' + a_4)} \quad (5.7)$$

Donde e_0 es el índice de poros inicial, p'_0 es la tensión neta inicial, p_{ref} es una presión de referencia, s es la succión y a_1, a_2, a_3 y a_4 son parámetros de la superficie de estado. La deformación volumétrica debida a succión queda:

$$d\varepsilon_v^s = \frac{ds}{K_t^s(p', s)} \quad (5.8)$$

La retracción producida por el aumento de succión tiene signo positivo que, de acuerdo con el criterio de signos adoptado, indica reducción de volumen.

Al inicio del ensayo, los incrementos de deformación son nulos, con lo que la ecuación (5.5) queda:

$$dp' = -\frac{K}{K^s} ds \quad (5.9)$$

Es decir, tracción en el agua que se traduce en una compresión sobre la matriz de suelo tal y como se observa en el primer apartado de este capítulo. La desecación sin restricciones o, mejor dicho, con restricciones mínimas produce solo tensiones de compresión que no producirán en principio agrietamiento.

5.4.1.8. Etapa de Contracción Isótropa

Se ha realizado la simulación de la geometría de la muestra ensayada por (Nahlawi & Kodikara, 2002) con la intención de reproducir la contracción isótropa observada en el laboratorio. Se ha aplicado una succión de 30 MPa en el contorno de la muestra utilizando el esquema mostrado en la

Figura 5.36a, que corresponde al esquema CC01-PC02 de la Figura 5.8, pero sin utilizar simetrías para reducir el problema a la mitad.

Las coacciones de los desplazamientos permiten la contracción volumétrica prácticamente sin restricción cuando se aplica succión en todo el contorno expuesto al aire. Para ello, en la simulación numérica, se ha fijado el punto central del borde inferior y se han impuesto coacciones verticales en el resto de los nodos del mismo.

Al principio del ensayo, la muestra consiste en una pasta semifluida de suelo contenida en un recipiente, la cual se comporta como un líquido. Al cabo de un tiempo esta pasta adquiere consistencia sólida debido a la desecación y se contrae separándose fácilmente de los bordes del molde debido a la lubricación utilizada. En la Figura 5.36b se presenta el campo de succión después de un día de secado, así como la configuración deformada, que predice el modelo.

La evolución del campo de succión es coherente con el proceso de desecación e indica que hay migración de humedad a través de los contornos que presentan valores impuestos de succión y que las zonas más secas están cerca del contorno y las más húmedas en el centro inferior de la muestra. Por lo visto en los apartados anteriores, también se sabe que la rigidez de la sección estudiada será mayor en los bordes expuestos a la succión y más blanda en la zona inferior central, lo cual permite la deformación isótropa por lo menos en las primeras horas del proceso.

Si se mantuvieran estas condiciones de contorno durante todo el tiempo de la simulación, la deformación de la muestra continuaría sin cambios y seguiría siendo de contracción isótropa. Las condiciones de contorno y los gradientes del campo de succión de la

Figura 5.36a y b, solo permiten la retracción hacia el centro de la muestra y por lo tanto contracción isótropa. En la realidad, las condiciones de contorno no son rígidas como en el modelo, la gran longitud de la muestra respecto de su espesor y unos campos de succión heterogéneos podrían producir deformaciones distintas a la isótropa. Sin embargo, la muestra presenta arqueado convexo al final del ensayo, que se explica por la diferencia de rigidez entre el borde expuesto a la succión que será más rígido y el borde inferior en contacto con el contenedor que será más blando, como se verá en la simulación de arqueado convexo.

En la Figura 5.37a se presenta la evolución de las tensiones horizontales y verticales en tres puntos de referencia: color verde cerca de la esquina superior izquierda, color rojo en el centro de la sección y color azul cerca de la esquina inferior derecha. Las mayores tensiones de compresión se dan en la zona inferior de la muestra y evolucionan más lentamente puesto que se encuentran alejados del contorno donde se impone la succión. Los puntos más cercanos a los bordes en contacto con el ambiente evolucionan más deprisa pero alcanzan valores menores de tensiones.

En la Figura 5.38b se muestra la evolución de la succión con el tiempo en un punto en el centro de la sección (punto de referencia blanco). En este punto la succión se estabiliza luego de un día de secado, pero las tensiones siguen evolucionando en otros puntos de la muestra como se observa en la Figura 5.37a (punto de referencia azul). En la Figura 5.38a se observa la rápida evolución del contenido volumétrico de humedad, lo cual se debe al pequeño espesor de la muestra.

Este pequeño espesor ocasiona dificultades tanto para las mediciones de laboratorio como para las simulaciones numéricas, lo cual se debe tener en cuenta en el diseño de experimentos.

En la Figura 5.39a se presenta la relación tensión-deformación (horizontal y vertical) en los tres puntos de referencia previamente mencionados. Se observa la no-linealidad del comportamiento y la diferencia en los valores alcanzados según la posición de los respectivos puntos. En la Figura 5.39b se comprueba que al ser el punto de referencia rojo central sólo sufre pequeños desplazamientos por ser un punto cercano al origen de los ejes de simetría del esquema en estudio. Se puede comprobar que en los puntos a la derecha e izquierda (azul y verde, respectivamente) aparecen desplazamientos horizontales importantes frente a pequeños desplazamientos verticales debido a la gran diferencia entre las dimensiones horizontales y verticales de la muestra.

En la Figura 5.40a y b se presentan la evolución de la porosidad y la relación entre el índice de poros y la succión. Se observa que los valores son razonables y permiten decir que esta simulación es válida para el análisis del proceso.

5.4.1.9. Etapa de Contracción con Arqueo Cóncavo

En el laboratorio se observa una segunda etapa con arqueado de los extremos de la muestra hacia arriba. Para capturar este fenómeno se ha hecho una segunda simulación con el esquema de la Figura 5.36c considerando que la succión también actúa en parte de la cara que está en contacto con el fondo del molde y disminuyendo las coacciones en estas zonas. En la realidad probablemente la succión no actúe sobre la cara inferior de la muestra desde el primer momento como en la simulación, pero es lógico pensar que con el transcurso de tiempo y suponiendo que la muestra se va deformando el aire húmedo se introduzca entre el suelo y la bandeja imponiendo succión también en el borde inferior.

El efecto en la deformación ha sido el esperado y se ha podido simular el arqueado cóncavo como se muestra en la Figura 5.36d donde también se muestra el campo de succión después de los 5 días de secado que duró el ensayo. Para reproducir el arqueado cóncavo, se ha considerado que el peso propio contribuye a que las condiciones de contorno sean del tipo apoyos fijos en la zona media del borde inferior de la malla, liberando las coacciones en el resto de nodos del mismo.

5.4.1.10. Etapa de Contracción con Arqueo Convexo

En el laboratorio se observa una tercera etapa en estos ensayos con un arqueado convexo como el mostrado en la Figura 5.29b. Se ha realizado una simulación utilizando el esquema presentado en la Figura 5.36e. Esta vez la condición de contorno en desplazamientos es el de una viga simplemente apoyada y la succión actúa en todo el contorno.

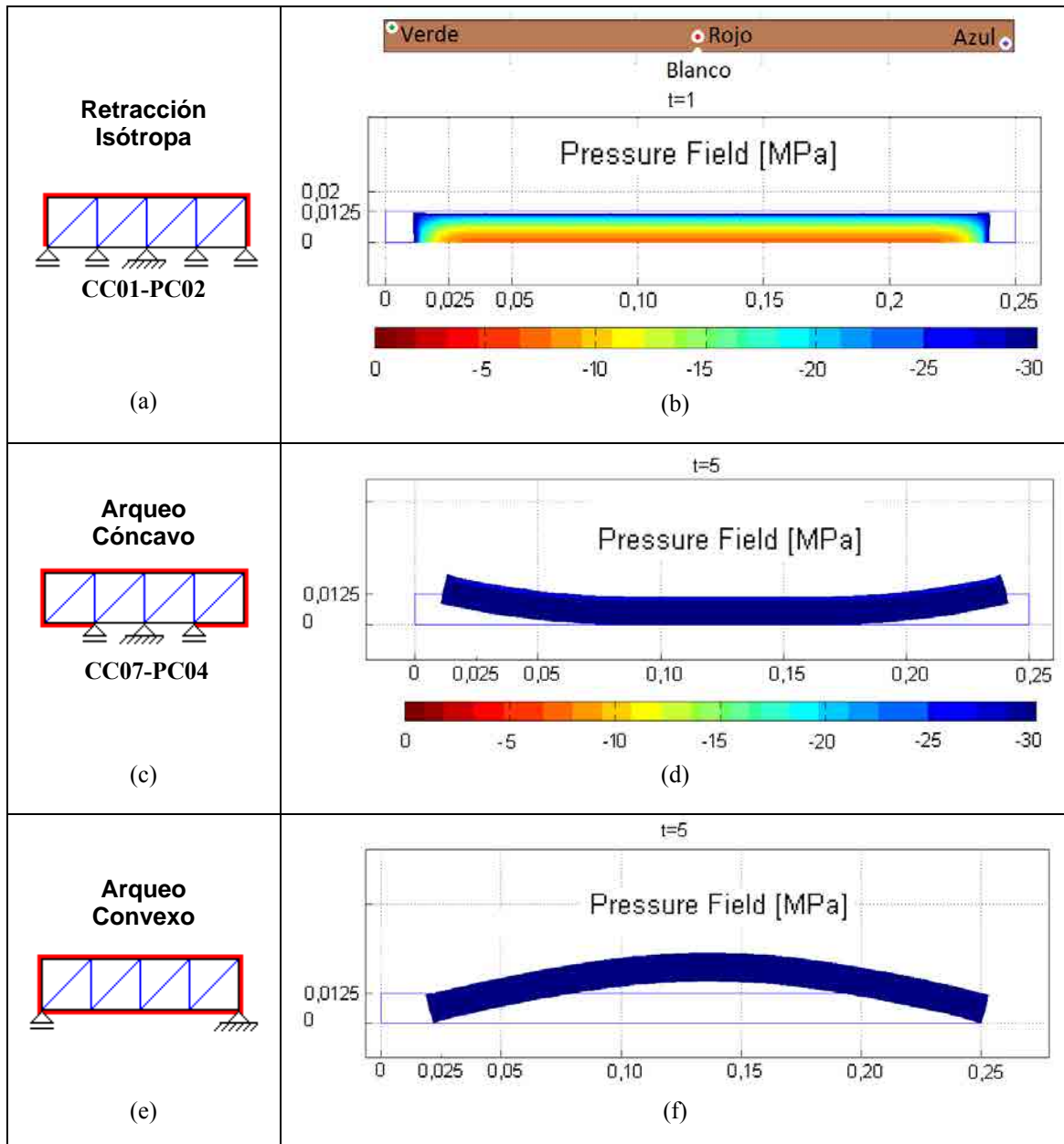


Figura 5.36 – Simulaciones usando el código en MATLAB: *a, b) contracción isótropa; c, d) arqueó cóncavo; e, f) arqueó convexo*

Nuevamente, el efecto es el esperado y se obtiene el arqueó convexo que se muestra en la Figura 5.36f. Debido a que el suelo es más blando por debajo al estar más húmedo durante el proceso de secado, éste finalmente se deforma más en dicha zona, induciendo una deformación tal como se muestra en los resultados de la Figura 5.36f.

Esta tercera condición de contorno es la más realista de las tres que se han supuesto si se tiene en cuenta que el contacto entre suelo y molde ha sido lubricado. Sin embargo, con esta única condición de contorno no es posible reproducir la contracción isótropa y el arqueó convexo. Esto

se debe a que en la realidad la interacción entre la muestra de suelo y el molde es más compleja y cambiante a lo largo del ensayo. La condición de contorno en succión también evoluciona a lo largo del ensayo y tiene efectos complejos como se ha podido analizar en los apartados anteriores, donde se han estudiado secciones radiales correspondientes a muestras cilíndricas de suelo.

Con todo lo expuesto queda demostrado que el modelo es capaz de reproducir las distintas etapas del proceso de arqueo y que captura el fenómeno.

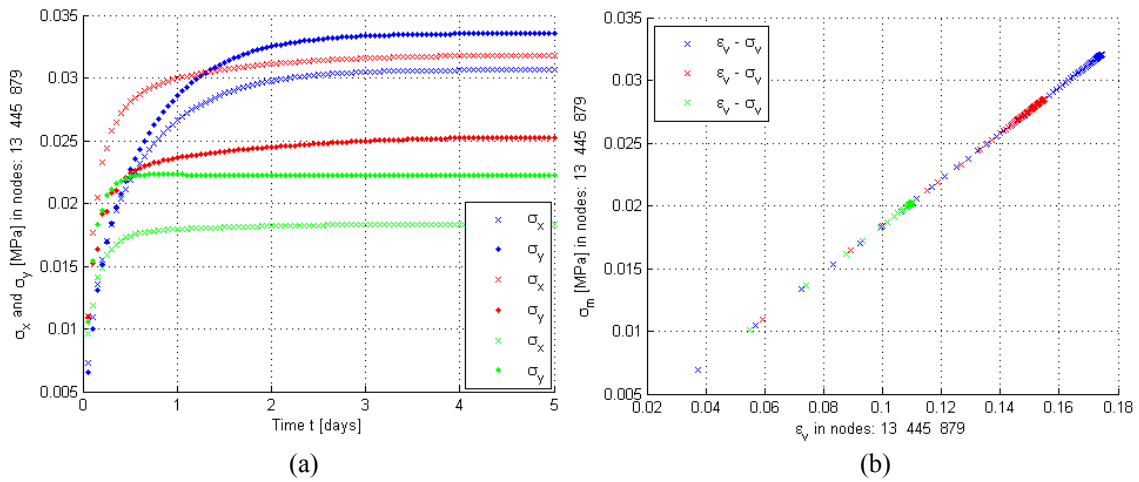


Figura 5.37 – Resultados de la simulación de la contracción isotrópica de la arcilla de Werribee en los puntos de referencia (azul, rojo y verde): *a) evolución de las tensiones; b) relación tensión media vs deformación volumétrica.*

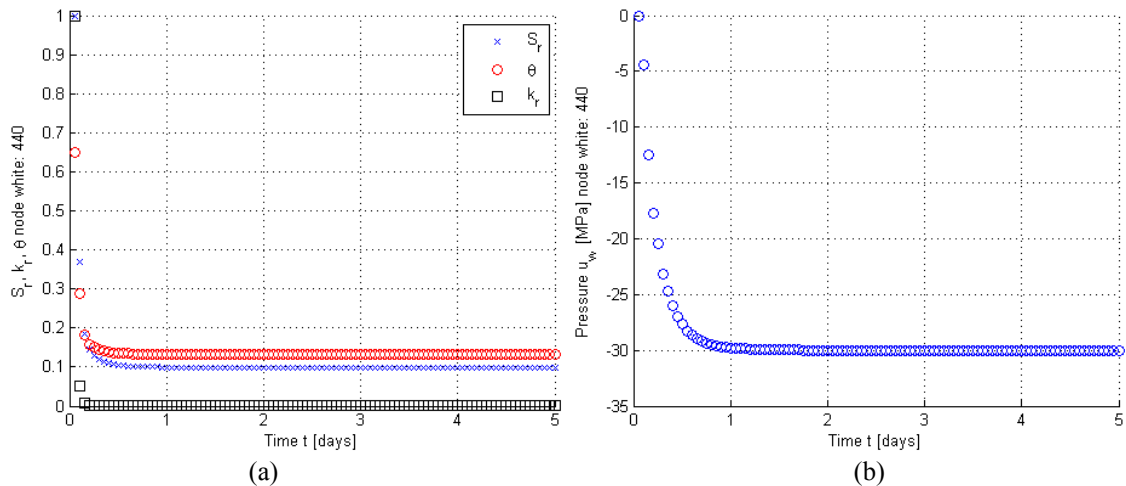


Figura 5.38 – Resultados de la simulación de la contracción isotrópica de la arcilla de Werribee en el punto de referencia blanco: *a) evolución del grado de saturación S_r , permeabilidad relativa k_r y contenido volumétrico de humedad θ ; b) evolución de la presión de poros.*

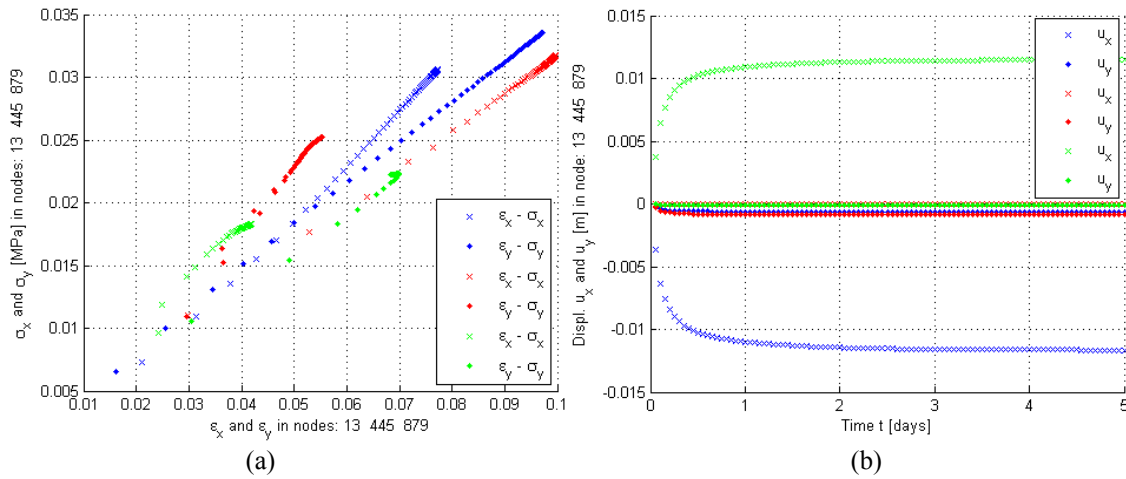


Figura 5.39 – Resultados de la simulación de la contracción isotrópica de la arcilla de Werribee en los puntos de referencia (azul, rojo y verde): a) relación tensión-deformación; b) evolución de los desplazamientos.

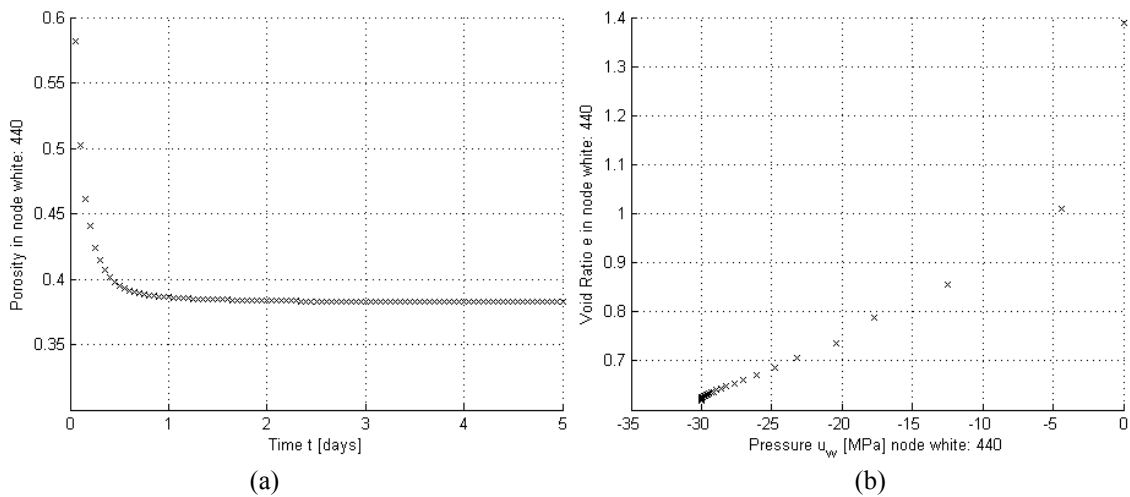


Figura 5.40 – Resultados de la simulación de la contracción isotrópica de la arcilla de Werribee en el punto de referencia blanco: a) evolución de la porosidad en el tiempo; b) evolución del índice de poros con la presión.

5.4.1.11. Comparación de los Resultados Experimentales con las Simulaciones con el Código FLAC y con el Código MATLAB de esta Tesis

En los ensayos experimentales, el arqueado convexo más significativo se produjo a las 70 horas aproximadamente en el ensayo 1 y a las 60 horas en el ensayo 3 (Nahlawi & Kodikara, 2002). Los resultados del análisis realizado con el código FLAC (Kodikara, et al., 2004) se han mostrado en la Figura 5.35.

Los resultados numéricos del modelo implementado en MATLAB son comparables con los resultados obtenidos con el código FLAC, dado que ambos utilizan elasticidad no lineal como

modelo constitutivo de la matriz de suelo, y grandes desplazamientos. Esto indica además, que el proceso hidráulico simulado con el modelo, reproduce el fenómeno medido en el laboratorio. La diferencia entre ambas simulaciones es que en el caso del código en MATLAB, la evolución de la succión es calculada (modelo hidromecánico) y en el caso del programa FLAC son impuestas (modelo mecánico).

En la fase de contracción isótropa, el acortamiento en el laboratorio fue del 17%, mientras que la simulación con el programa en MATLAB predice un 10%. En cuanto al arqueado, la simulación con MATLAB predice una elevación en los extremos de 1 cm, mientras que la simulación con FLAC predice una elevación menor (Figura 5.35). No hay datos experimentales que permitan decidir acerca de la bondad de estos resultados. La deformación final en la clave del arco en el experimento fue de 2.6 cm mientras que en la simulación con MATLAB fue de 1.8 cm.

La simulación predice el arqueado cóncavo máximo en las primeras 24 horas de la simulación. El arqueado convexo se produce en la simulación con MATLAB a las 40 horas en contraste con los ensayos de laboratorio que oscilan entre 60-70 horas.

5.4.1.12. Discusión de los Resultados del Fenómeno de Arqueado en Muestras de Pequeño Espesor

Se ha visto que la simulación numérica evoluciona en general más rápidamente que el ensayo en cuanto a los perfiles de succión y desaturación. Se ha intentado mejorar esta respuesta mediante la calibración de los parámetros del modelo pero no se ha conseguido convergencia. Debido a las pequeñas dimensiones de la muestra, el calibrado resulta complicado. Sin embargo, no se disponen de muchos ensayos de laboratorio para asegurar la repetitividad de los resultados discutidos aquí y hacer un estudio estadístico de cómo se desarrolla la succión en una muestra de este tamaño y, por lo tanto, no se pueden dar garantías de que los resultados numéricos sean “peores” que los experimentales. Se considera que la exactitud de los resultados es suficiente como para asegurar que los mecanismos principales del proceso son capturados y el modelo es adecuado para su estudio.

Con el código FLAC, los autores (Kodikara, et al., 2004) utilizaron para la simulación los perfiles de succión medidos en el laboratorio (no fueron calculados numéricamente) y por lo tanto es un modelo únicamente mecánico. La ventaja que tiene sobre el modelo de esta tesis es la posibilidad de interacción con la base de apoyo de la muestra. Esta característica es deseable pero tiene cierta complejidad de implementación.

Los resultados obtenidos con MATLAB de los análisis de las distintas etapas son buenos. Estos resultados son asintóticos con el tiempo y tienen valores coherentes y que están dentro del rango de laboratorio. Además, se consiguen reproducir mecanismos que explican el comportamiento de la muestra de suelo sometida a desecación. Queda claro además que el estudio de muestras de pequeñas dimensiones es más complicado, lo cual induce a trabajar con muestras más grandes para luego volver sobre las pequeñas cuanto los modelos estén más desarrollados.

Es evidente que este tipo de suelos tiene una capacidad de deformación importante debido a su gran plasticidad. Además, el hecho de no producirse grietas durante el proceso por no haber coacciones que las induzcan, aumenta el efecto de arqueo como se ha analizado en el apartado 5.3.1. Resulta evidente que si se introducen coacciones, se generaran grietas en el suelo. De hecho, se han realizado experimentos en muestras de la misma arcilla de Werribee (Nahlawi & Kodikara, 2006) con dimensiones similares, en contenedores con coacciones de los desplazamientos en los cuales se generan grietas transversales que reducen notablemente el efecto del arqueo estudiado aquí.

Se han identificado en el laboratorio y se han simulado tres etapas diferenciadas. La primera etapa denominada isótropa se debe, en concordancia con lo que dice Kodikara, et al. (2004) a que la rigidez de la muestra es pequeña en las primeras horas del ensayo y que las diferencias en rigidez serán pequeñas también, con lo cual la retracción tenderá naturalmente a ser isótropa.

El arqueo es un fenómeno que se debe principalmente a la rigidez diferencial que presenta el suelo al secarse y que produce una distribución de tensiones diferenciales a lo largo del espesor de la muestra de suelo. Esto último produce un efecto de flexión de la muestra cuando ésta posee una consistencia suficiente. El fenómeno es capturado por el modelo propuesto y tiene que ver estrechamente con las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión.

Evidentemente, existen interacciones entre las condiciones de contorno, el agrietamiento, el arqueo y la rigidez del suelo. Además, todos estos elementos cambian a lo largo del tiempo con el avance del proceso.

Los suelos se desecan sin grietas cuando no hay restricciones según predicen las simulaciones y se pudo comprobar en el laboratorio, al menos para ciertos tipos de suelos arcillosos. El problema es que diseñar ensayos sin restricciones tiene cierta dificultad y no es la tendencia común en este campo.

5.4.2. Análisis de la Dsecación de Muestras de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

En esta tesis (Capítulo 3, Análisis Experimental) se ha hecho un ensayo de secado sobre una muestra cilíndrica de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura, utilizando las máximas prestaciones de la cámara ambiental en cuanto a capacidad de secado. Lakshmikantha (2009) ha presentado dos ensayos en muestras de idéntico tamaño y usando el mismo suelo, secada en ambiente de laboratorio y en la misma cámara ambiental, respectivamente. En los dos apartados siguientes se presenta un resumen de los resultados de los dos ensayos de Lakshmikantha (2009) para hacer un estudio comparativo con los resultados obtenidos en esta Tesis. Se completa el análisis de la desecación con la simulación de ensayos en muestras cilíndricas de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura, contrastando los resultados numéricos con los obtenidos en laboratorio.

5.4.2.1. Ensayo con una Muestra de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Ambiente de Laboratorio (Lakshmikantha, 2009)

Este ensayo es parte del trabajo de Lakshmikantha (2009) y consiste en una muestra de suelo de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura (Figura 5.41b) que fue secada en ambiente de laboratorio. La temperatura se mantuvo a $21\pm 2^\circ\text{C}$ y la humedad relativa del ambiente fue constante e igual al 40% (Figura 5.43a). La bandeja contenedora era de fondo rugoso con ranuras circulares como se observa en la Figura 5.41. El ensayo tuvo una duración de 110 días, aunque el equilibrio de la pérdida de humedad en el suelo se alcanzó a los 40 días. La muestra estuvo instrumentada con dos sensores Vaisala en dos puntos diametralmente opuestos y cercanos al contorno a 5 cm de profundidad, y con cuatro tensiómetros en el interior de la masa de suelo, uno en el centro y los otros tres equidistantes de este último y cerca del contorno (Figura 5.42a). Desde la superficie solo se produjo una grieta perimetral que se propagó de arriba hacia abajo, separando por completo el suelo de la pared de la bandeja. En la parte inferior de la muestra se produjeron grietas radiales y curvas más o menos concéntricas con el centro de la muestra (Figura 5.42b). Se pudo inferir un efecto de arqueado de los extremos hacia arriba, notando que las marcas del fondo de la muestra, debidas a las ranuras de la bandeja, son menos prominentes en los bordes que en el centro de la cara inferior.

En la Figura 5.43a se observa la evolución de la temperatura del aire y el suelo, la humedad relativa del aire y del suelo, y la pérdida de humedad del suelo a lo largo del ensayo. El suelo permaneció saturado hasta los 20-21 días cuando la humedad del suelo era del 12%.

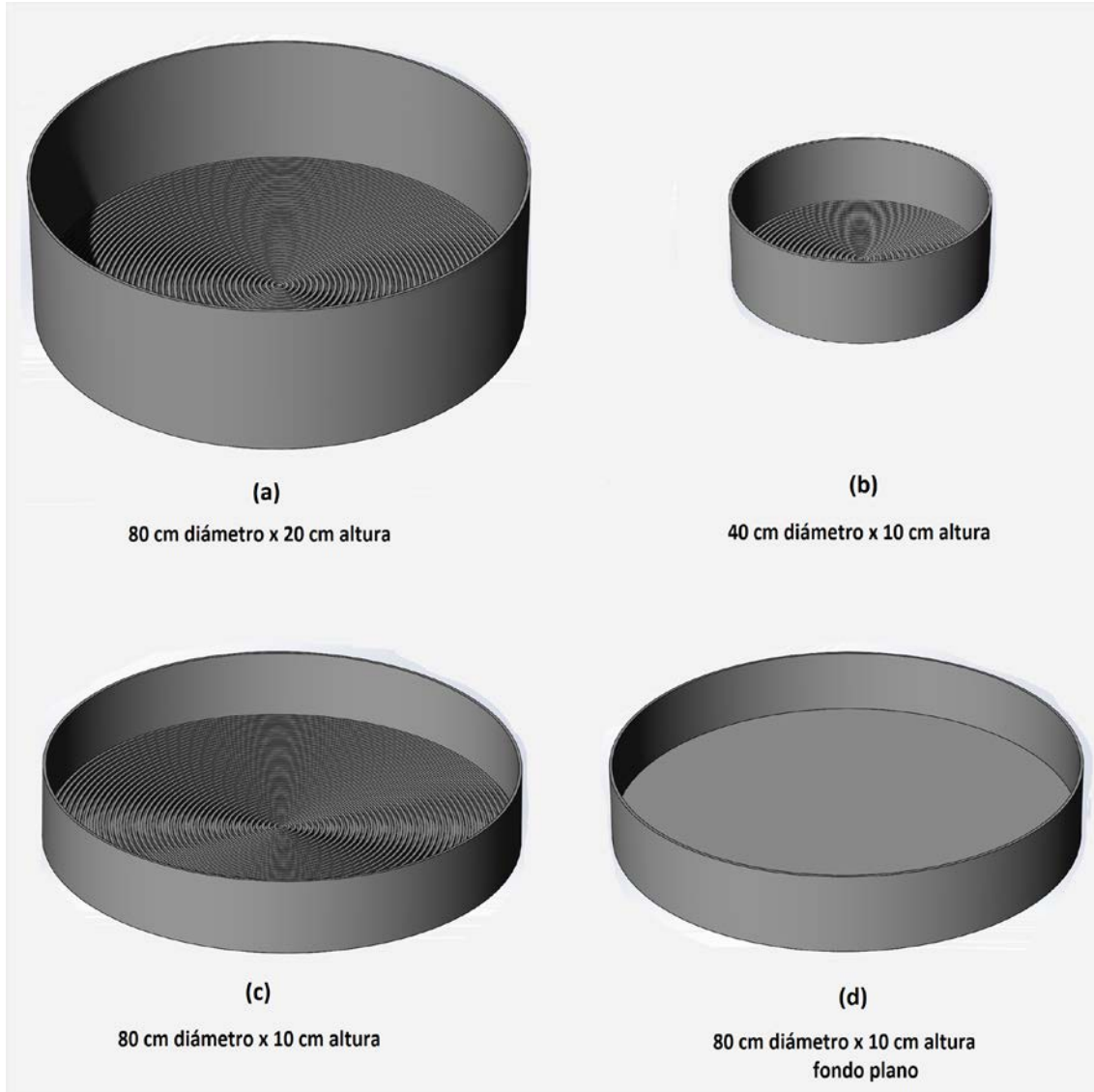


Figura 5.41 – Bandejas circulares para muestras cilíndricas de suelo utilizadas en los análisis de esta tesis: a) 80 cm de diámetro \times 20 cm de altura; b) 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura; c) 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura; d) 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura con fondo liso.

La succión medida con los dos sensores Vaisala (Figura 5.43b) es diferente debido a que hay una grieta radial que pudo afectar las lecturas de uno de ellos (Figura 5.42b). La máxima succión medida está entre los 70-80 MPa. El aumento considerable de los valores de succión comienza a los 20-21 días. Hasta allí la succión se incrementó lentamente hasta alcanzar valores pico de unos 80 kPa entre los días 16-17. Durante los primeros 10 días la succión apenas alcanzó una media de 20 kPa por lo que en la escala total del proceso los primeros días prácticamente no acusan aumento de succión.

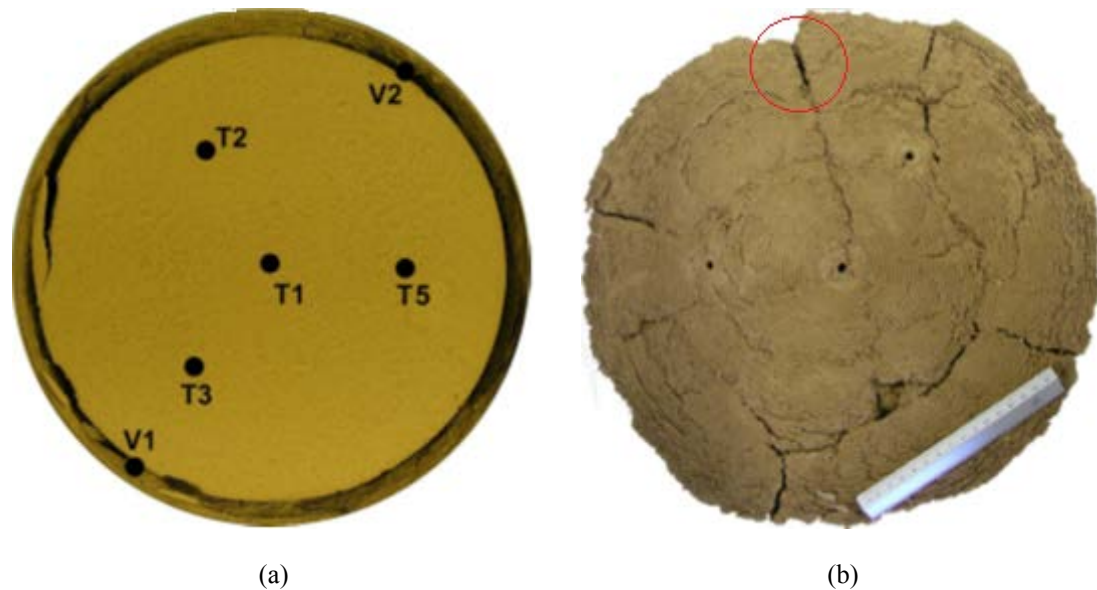


Figura 5.42 – a) Cara superior de la muestra de suelo de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura desecada en ambiente de laboratorio durante 110 días. Se observa la ubicación en planta de los dos sensores Vaisala, V1-V2 y los cuatro tensiómetros, T1, T2, T3 y T4; b) Cara inferior; se indica la grieta radial que pudo afectar las mediciones del sensor Vaisala V2 (Lakshmikantha, 2009).

5.4.2.2. Ensayo con una Muestra de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009)

Este ensayo también es parte del trabajo de Lakshmikantha (2009) y corresponde a una muestra de suelo de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura que fue secada en cámara ambiental. La temperatura de la cámara se mantuvo a 35°C y la humedad relativa del ambiente se mantuvo en el 40%. La bandeja contenedora disponía de un fondo rugoso con marcas circulares (Figura 5.41b). El ensayo tuvo una duración de 45 días, aunque el equilibrio de la pérdida de humedad en el suelo se alcanzó a los 40 días. La distribución de la instrumentación es idéntica al caso anterior.

El patrón de agrietamiento es similar al caso anterior con una sola grieta perimetral en la superficie de arriba y grietas radiales y circulares en la parte de abajo. Estas últimas muestran un patrón jerárquico²¹ (Lakshmikantha, et al., 2013) y no se produjeron al mismo tiempo. Se deduce de sus dimensiones que las grietas circulares concéntricas se produjeron primero, seguidas de las grietas radiales que acometen en ángulo recto las grietas circulares (Figura 5.44).

²¹ Patrón jerárquico de grietas: en la literatura se habla de grietas primarias, secundarias, terciarias, etc. Las primarias son las grietas que se producen en primera instancia. Grieta secundaria es aquella que se produce entre dos primarias. Una grieta es terciaria si se produce entre dos secundarias o entre una primaria y otra secundaria, etc. (Nahlawi & Kodikara, 2006)

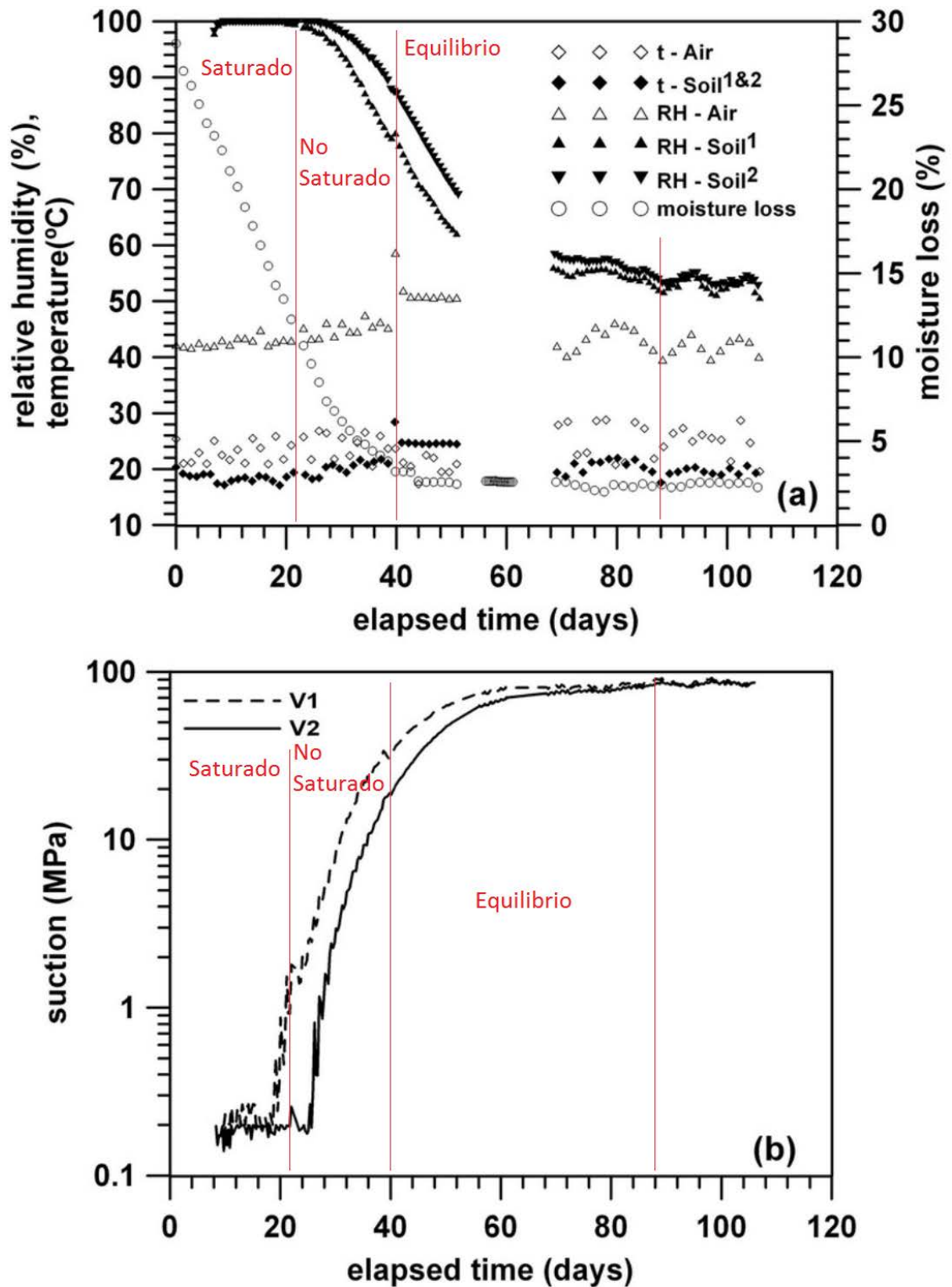


Figura 5.43 – Evolución de las variables durante el ensayo de desecación en muestra de suelo cilíndrica de 40 cm de diámetro y 10 cm de altura: a) temperatura del aire y el suelo, humedad relativa del aire y del suelo, pérdida de humedad del suelo durante el ensayo; b) evolución de la succión en el suelo durante el ensayo (Lakshmikantha, 2009).

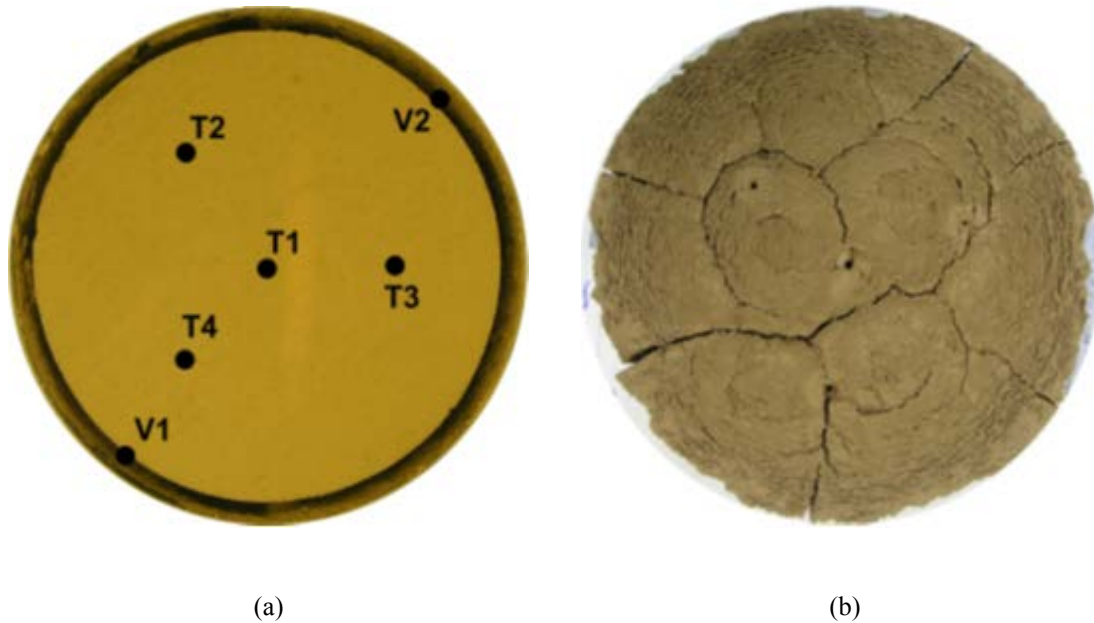


Figura 5.44 – Cara superior e inferior de muestra de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura después de ser desecada en cámara ambiental durante 45 días (Lakshmikantha, 2009)

Se distinguen nuevamente dos etapas de desecación, pero esta vez la primera es no saturada con una humedad relativa del suelo del 95% durante los primeros 15-16 días.

Las grietas radiales se pueden justificar por un fenómeno de arqueo del suelo el cual se produce en la segunda etapa ya que antes el suelo no es lo suficientemente rígido como para producirlo dados los valores bajos de la succión.

Se comprobó además que la parte central de la muestra permaneció en contacto con la bandeja en todo momento.

El contenido de humedad en la muestra alcanzó el equilibrio a los 32-34 días de comenzado el ensayo, cuando la humedad relativa del suelo era del 50%.

La humedad relativa del suelo comenzó a disminuir a los 15-16 días muy lentamente hasta el día 18. A partir de allí la humedad relativa del suelo disminuyó hasta el día 40.

La lectura de los sensores Vaisala (Figura 5.45b) de los cuales se obtiene la succión es similar para los dos sensores puesto que no hay ninguna grieta que pueda haber modificado dichas lecturas.

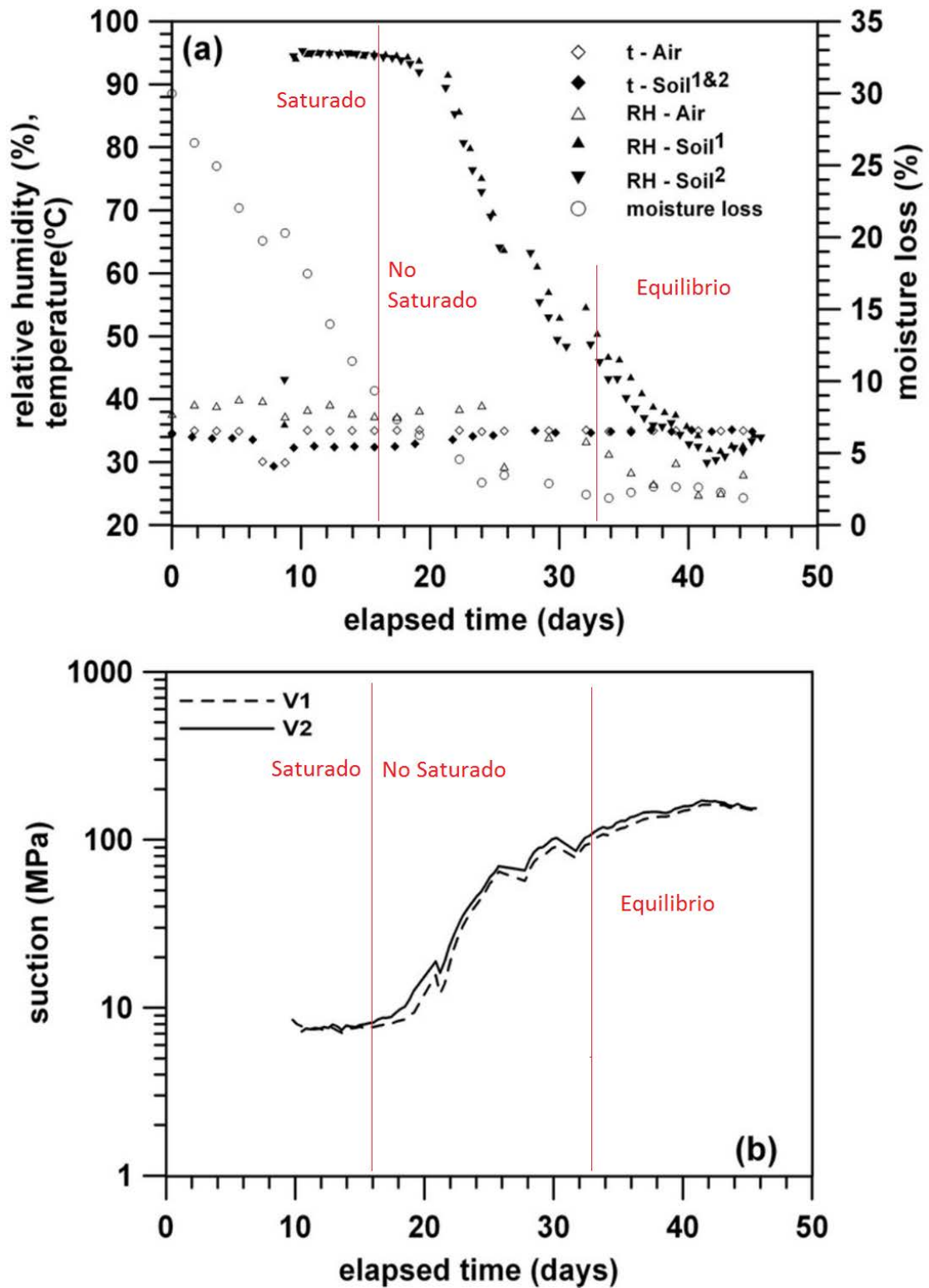


Figura 5.45 – Evolución de las variables durante el ensayo de desecación en muestra de suelo cilíndrica de 40 cm de diámetro y 10 cm de altura: a) temperatura del aire y el suelo, humedad relativa del aire y del suelo, pérdida de humedad del suelo durante el ensayo; b) evolución de la succión en el suelo durante el ensayo (Lakshmikantha, 2009).

5.4.2.3. Ensayo con una Muestra de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada Rápidamente en Cámara Ambiental

En el Capítulo 3, Análisis Experimental, de esta tesis se ha presentado un ensayo de secado rápido donde las condiciones de contorno en presión de poros han forzado la formación de una grieta central de gran grosor, que se propagó a lo largo de todo el diámetro de la muestra de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura (Figura 5.41b). La muestra desecada y su aspecto al final del ensayo se muestra en la Figura 5.46. La temperatura de la cámara se mantuvo a 45°C y la humedad relativa del ambiente en el 30%.

Se ha observado que durante el primer día se han producido las grietas en el contorno y posteriormente, durante el segundo día, se produce una grieta central desde el centro de la muestra que se propaga hacia los extremos de la misma abarcando todo el diámetro. La duración del ensayo fue de 6 días.

5.4.2.4. Comparación de los Resultados de Ensayos sobre Muestras Cilíndricas de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

Los dos ensayos de (Lakshmikantha, 2009) difieren en que se han fijado valores de temperatura diferentes, 21°C en el primer caso y 35°C en el segundo. Además, según los resultados mostrados, en el primer caso el suelo estuvo saturado al principio y en el segundo caso no. En ambos casos se observa una primera etapa donde la evolución de la succión es lenta y con valores pequeños si se comparan con los valores al final de los ensayos y que no alcanzan los 100 kPa. Posteriormente en ambos casos la succión aumenta rápidamente y alcanza valores del orden de los 100 MPa. La restricción de la temperatura en la cámara ambiental ha producido una disminución de la humedad relativa del suelo más pronunciada y más rápida. Los valores de la succión alcanzados en la cámara ambiental han sido también más altos y han evolucionado más deprisa. Es evidente que la temperatura es una variable fundamental en este proceso.

Para el ensayo de secado rápido, se ha impuesto una temperatura de 45°C y una humedad relativa del ambiente del 30%. Además, al haber dispuesto las lámparas halógenas cerca de la muestra se han inducido dos focos de desecación mucho más intenso que en los casos anteriores.

El desarrollo mucho más rápido de las grietas era de esperar debido a que se fuerza la desecación rápida en comparación con los otros ensayos. La grieta central obtenida se ha producido porque la disposición de las lámparas halógenas ha generado una banda diametral de menor rigidez durante el proceso de secado donde se activó un mecanismo de agrietamiento.



Figura 5.46 – Aspecto final de la muestra sometida a secado rápido.

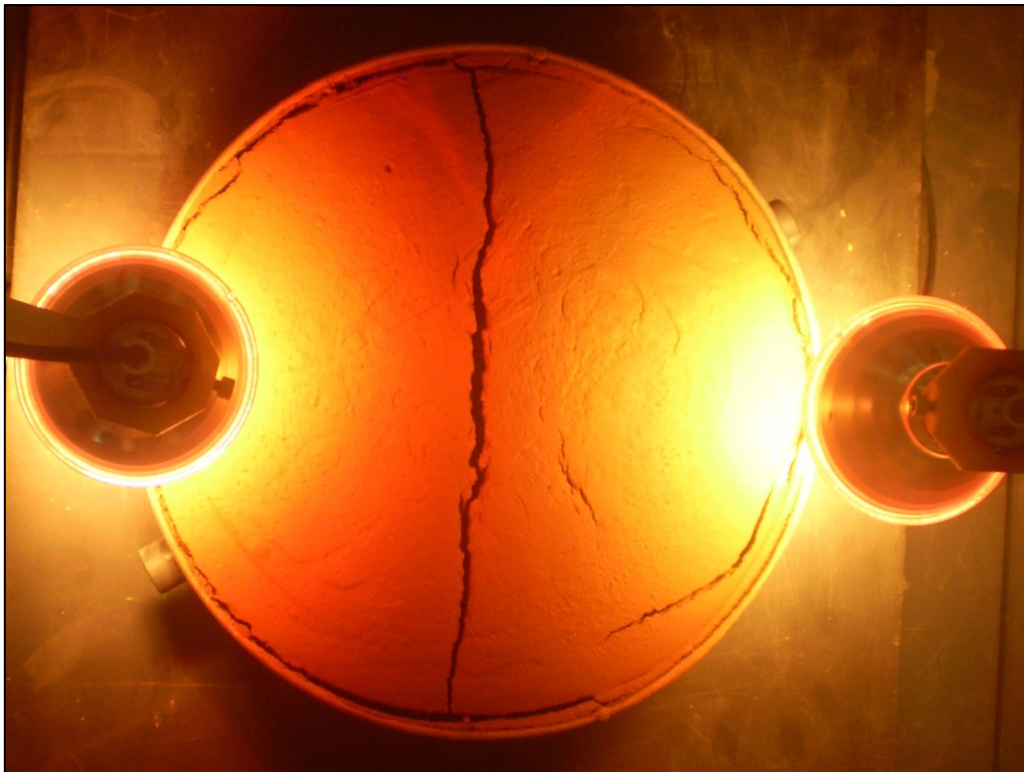


Figura 5.47 – Aplicación de condiciones de contorno que fuerzan el secado rápido

En general está bien establecido que durante el proceso de desecación existen tres etapas bien diferenciadas (Bronswijk, 1988). La primera es la retracción con el suelo saturado, debido a que la deformación se ve compensada exactamente con la pérdida de humedad. La segunda etapa corresponde a la retracción en estado no saturado, y comienza cuando la presión capilar alcanza el valor de entrada del aire a la red de capilares del suelo. La fase líquida se va haciendo más y más discontinua. La tercera etapa es de retracción nula, el suelo no presenta cambios volumétricos apreciables.

En los ensayos de (Lakshmikantha, 2009) la primera etapa saturada duró aproximadamente 18-20 días, mientras que el resto del tiempo el suelo estuvo no saturado. Se observa en este ensayo que el comportamiento de la succión es distinto en estas dos primeras etapas: en condiciones de suelo saturado la succión aumenta lentamente y rápidamente en condiciones de suelo no saturado, lo cual debe tenerse en cuenta si se quiere simular con exactitud este tipo de ensayos. En la Figura 5.43 y Figura 5.45, se muestran las tres etapas. Se observa que una vez alcanzado el equilibrio, hay variables importantes que evolucionan con el tiempo (succión y humedad del suelo). Esto es, a pesar de que la muestra ya no tiene suficiente humedad para seguir humedeciendo el ambiente (laboratorio o cámara ambiental), si se produce una redistribución del agua remanente en la muestra lo cual produce aumento de succión y disminución de humedad en el suelo, en los puntos donde están dispuestos los sensores.

El ensayo de secado rápido demuestra la influencia que tiene la velocidad de secado y la temperatura en este proceso. La grieta central que tuvo lugar en este ensayo fue posible, además de debido a una distribución diferencial de la resistencia a la tracción del suelo, porque el sistema disponía de mayor energía. Como postula la Mecánica de Fractura, cuando una muestra se forma y propaga, consume energía en una cantidad proporcional a la nueva superficie creada. Es evidente que, en comparación, el último ensayo presenta una grieta adicional que requiere energía extra para generar una superficie de 800 cm^2 , que corresponden a las dos caras de la grieta central. Además, se conoce que existe una relación entre la configuración de agrietamiento y la velocidad de secado (Corte & Higashi, 1960).

5.4.2.5. Simulación de Ensayo de Secado Rápido en una Muestra de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

En los apartados anteriores se ha visto que el proceso de desecación en muestras de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura presenta dos etapas. La primera etapa consiste en un proceso de retracción sin agrietamiento, producido por la desecación. La segunda etapa consiste en desecación, retracción y agrietamiento en la cual se puede identificar grietas de dos tipos:

Tipo 1: *Bien definidas y que se propagan toda la altura de la muestra. Se originan en los bordes en el contacto con la bandeja contenedora y son prácticamente verticales. Además, son las primeras grietas que se producen (Figura 5.48a).*

Tipo 2: *Grietas curvas o radiales que no se propagan en toda la altura de la muestra. Se originan en la superficie inferior y se propagan hacia arriba. Algunas son concéntricas unas con otras (Figura 5.48b y c) (Lakshmikantha, et al., 2013).*

Tanto con el análisis de los resultados experimentales como con los análisis numéricos realizados hasta aquí, queda claro que existe una fuerte interacción entre las grietas, su evolución y el problema hidromecánico de desecación y retracción. Se ha analizado la influencia de las condiciones de contorno en desplazamiento y en succión sobre el comportamiento en desecación. Se ha estudiado la influencia de una grieta central y se ha visto su efecto sobre el arqueado. Se han estudiado, también, los efectos de las grietas laterales en el comportamiento de la muestra.

La desecación viene seguida de retracción y agrietamiento, además de un proceso de arqueado que es más o menos pronunciado según las restricciones que produzcan las condiciones de contorno en desplazamientos, según las dimensiones de la muestra y según la plasticidad del suelo. El agrietamiento cambia las condiciones de contorno en desplazamientos y en succión.

5.4.2.6. Enfoque del Modelo Numérico de esta Tesis

En la Figura 5.47 se observa cómo se han colocado las lámparas halógenas que fuerzan el secado rápido sobre la muestra de suelo durante el ensayo. Se estudia la evolución de la desecación de una muestra de suelo de 40 cm de diámetro por 10 cm de altura, simulando una sección diametral como la mostrada en la Figura 5.18 y que corresponde a la sección diametral, perpendicular a la grieta central como se ve en la Figura 5.49.

El código con el que se trabaja en esta Tesis, está basado en una formulación hidromecánica, por lo tanto no es posible añadir la variable temperatura. Para estudiar lo que sucede durante el ensayo se procede a la simulación de los esquemas presentados en la Figura 5.50, donde se observa que la presión de poros se impone con valores no constantes, concentrada en las zonas donde han influido con mayor intensidad las lámparas halógenas. La aplicación de la succión en el contorno se presenta en la Figura 5.51.

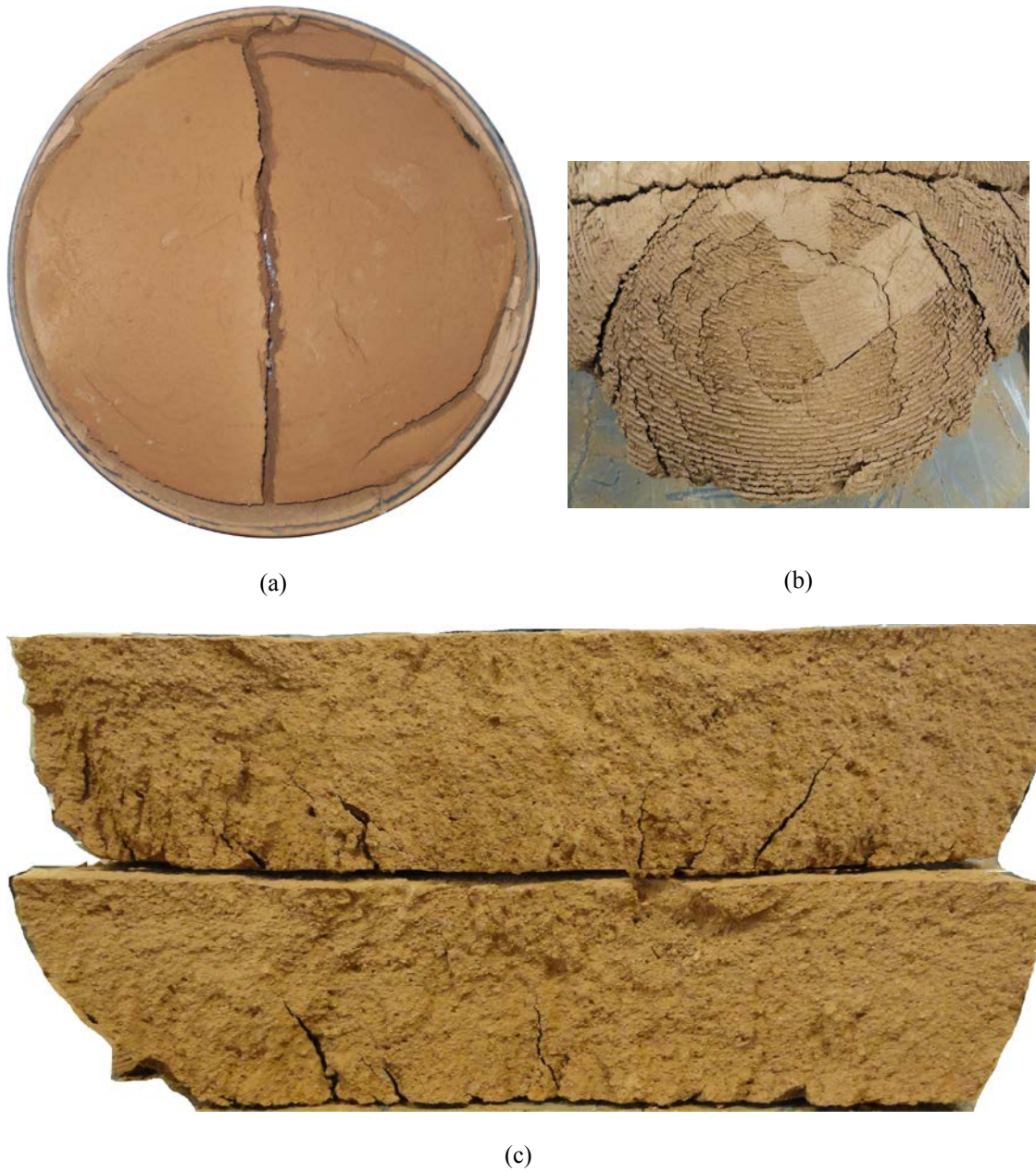


Figura 5.48 – Grietas al final del ensayo de secado rápido: *a) Grietas de Tipo 1 (se propagan toda la altura de la muestra y están bien definidas. Son prácticamente verticales; b y c) Grietas de tipo 2 (curvas, no alcanzan a propagarse toda la altura de la muestra. Pueden ser verticales u oblicuas)*

Las simulaciones numéricas demuestran que esta condición de contorno reproduce el efecto de la disposición de las lámparas halógenas en el ensayo. Se utilizan como referencia, además del ensayo de secado rápido, los ensayos de (Lakshmikantha, 2009) en bandejas de igual tamaño que la estudiada aquí y cuyos resultados se han presentado en los apartados precedentes. La temperatura en el ensayo que se simula, si bien es más alta que en los ensayos de

(Lakshmikantha, 2009), es constante, con lo cual un modelo hidromecánico en condiciones isotermas se considera válido para el análisis.

Se establecen tres tipos de condiciones de contorno en desplazamientos: CC14, CC02b y CC18. Además, cinco tipos de condiciones de contorno en succión: PCA, PCB, PCC, PCD y PCE (Figura 5.50).

Durante el ensayo de secado rápido, las condiciones de contorno cambian a medida que se producen las grietas. Los seis casos analizados se representan con seis esquemas distintos que se han diseñado para seguir los principales acontecimientos del ensayo y para estudiar la capacidad que tiene cada esquema en la simulación del proceso en laboratorio. El primer esquema (CC14-PCA) corresponde a la etapa en que el suelo se encuentra adherido a la bandeja en todo su contorno y con succión impuesta solo en el contorno superior, puesto que los bordes están en contacto íntimo con la bandeja, impidiendo la interacción con el ambiente. El perfil de succión aplicado en el contorno superior es como el presentado en la Figura 5.51. El segundo esquema (CC02b-PCA) corresponde al inicio de pérdida de adherencia con los laterales de la bandeja, cuando la condición de contorno en desplazamientos cambia pero no se aplica succión en los laterales, ya que se supone que el suelo está todavía muy cerca de la pared de la bandeja, impidiendo la interacción con el ambiente. El tercer esquema (CC18-PCB) se corresponde con el desprendimiento parcial de la muestra de los contornos de la bandeja y se supone que la succión actúa parcialmente en los bordes con un valor de 60 MPa, ya que en esta etapa se considera que la propagación de la grieta del contorno está desarrollándose. Con el cuarto esquema (CC18-PCC) se considera que la succión actúa en todo el borde lateral y el borde superior, lo cual se corresponde con la propagación total de la grieta lateral que desprende por completo la muestra de los bordes de la bandeja. El quinto esquema (CC18-PCD) corresponde al momento en que la grieta central se ha iniciado y propagado parcialmente. Se aplica una succión de 60 MPa en los contornos de la grieta. Finalmente, el sexto esquema (CC18-PCE) corresponde al caso en que la grieta está casi completamente desarrollada a lo largo de todo el espesor de la muestra. En este caso también se aplica una succión de 60 MPa en toda la longitud de la grieta.

La elección de los esquemas anteriores obedece a que reproducen de manera aproximada lo que sucede en el laboratorio en las diferentes etapas del ensayo. Como no se tiene información respecto de la adherencia con la bandeja, la condición de contorno en dicho contacto varía desde el esquema CC14 (adherencia total) pasando al CC02b (adherencia solo en la dirección paralela a la pared de la bandeja) y finalmente llegando al CC18 (no adherencia) cuando la grieta lateral está completamente desarrollada.

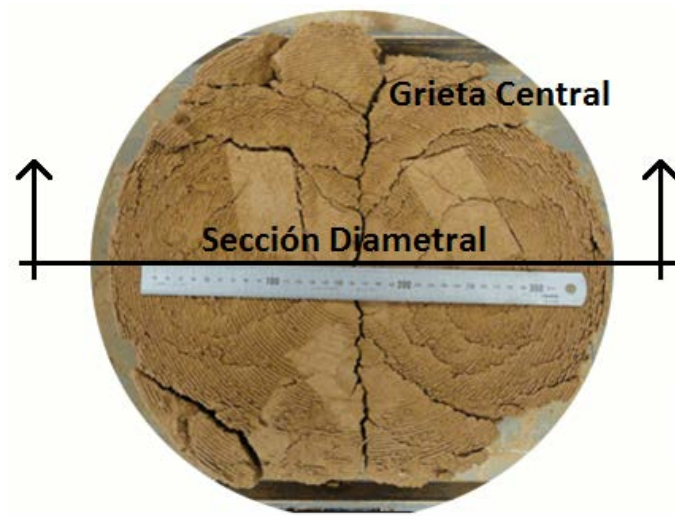


Figura 5.49 - Aspecto de la cara inferior de la muestra al final del ensayo de secado rápido. Sección estudiada numéricamente.

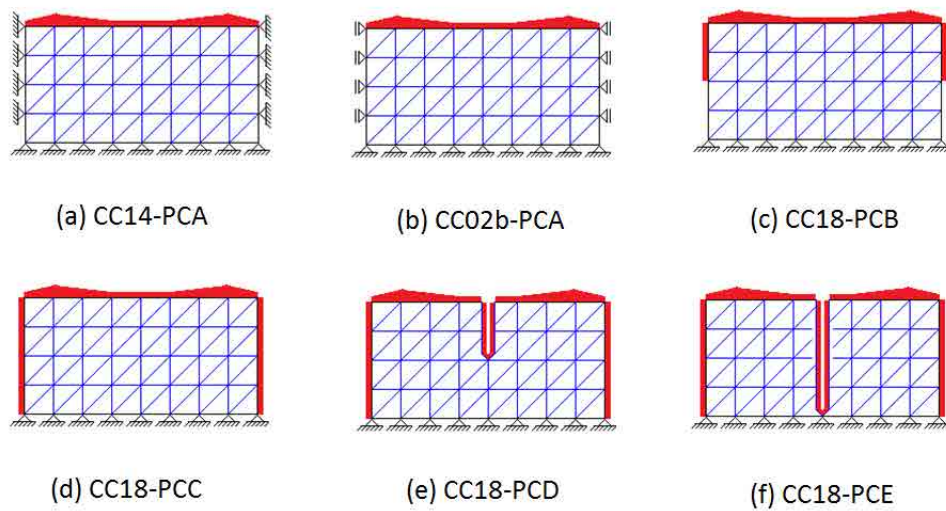


Figura 5.50 – Esquemas utilizados para el análisis de desecación en muestra de suelo de 40 cm de diámetro × 10 cm de altura. La geometría se corresponde con una sección diametral de la muestra cilíndrica.

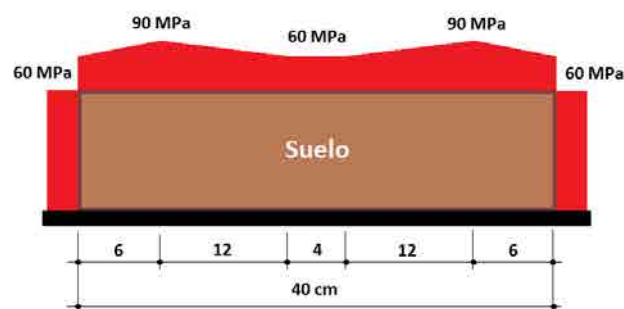


Figura 5.51 – Valores de succión aplicados como condición de contorno del esquema CC18-PCC.

La grieta en el contorno, en contacto con la bandeja, se produce el día 2 en el ensayo de secado rápido. Así, en un primer momento la succión es impuesta por el ambiente solo en el borde superior, pero una vez la grieta lateral se produce, la succión también actúa en los bordes laterales, cuando la grieta se separa lo suficiente de la bandeja.

Con el análisis de este ensayo, se establece una metodología de trabajo que ya se ha utilizado en secciones anteriores. La dificultad de simular el proceso con la formación y propagación de todas las grietas se solventa realizando un estudio comparativo de distintas situaciones que, aunque hipotéticas, están basadas en situaciones producidas en el laboratorio respecto al proceso de desecación, retracción y agrietamiento en muestras de arcilla.

5.4.2.6.1. Etapa 1: Análisis de Desecación con el Esquema CC14-PCA

Un esquema válido para el análisis de la desecación hasta el inicio de la primera grieta es el CC14-PCA (Figura 5.50a). En este esquema se utiliza una condición de contorno que restringe todos los desplazamientos en los nodos que están en contacto con la bandeja contenedora de suelo. En el borde superior se aplica succión con el perfil mostrado en la Figura 5.51. En los laterales de la sección no se aplica succión en este caso, puesto que se supone que antes del agrietamiento el suelo no está en contacto con el ambiente que impone succión. En este caso no hay grietas.

En la Figura 5.52a, se presenta el campo de succión en la muestra al cabo de 6 días de desecación. Se observa que la distorsión producida por la aplicación concentrada de la succión se suma al efecto de la deformación de la matriz de suelo en el contorno superior, modificando dicho perfil y, como se verá, los campos de tensiones horizontales y verticales.

En la Figura 5.52b, se presenta el campo de tensiones horizontales que muestran claramente tracciones en las esquinas superiores. Allí se iniciarán las grietas y se propagarán hacia el fondo de la bandeja. Como se ve en la figura, la zona de tracción es relativamente amplia y esto condiciona el lugar exacto donde se produce la grieta. No se sabe cuál es la tensión máxima de adherencia entre el suelo y la bandeja que hay que vencer, pero sí es evidente que este valor cambia a lo largo del proceso y será muy probablemente función de la succión. En un momento dado, será la resistencia a tracción o la tensión máxima de adherencia la que condicione que la grieta se forme en el contacto exacto con la bandeja o bien en algún punto próximo al borde. En los ensayos se ha visto que a veces el desprendimiento del suelo respecto de la bandeja es limpio, pero a veces la adherencia es considerable y deja adheridos al contorno porciones de suelo (ver, por ejemplo, las Figura 5.77 y Figura 5.78).

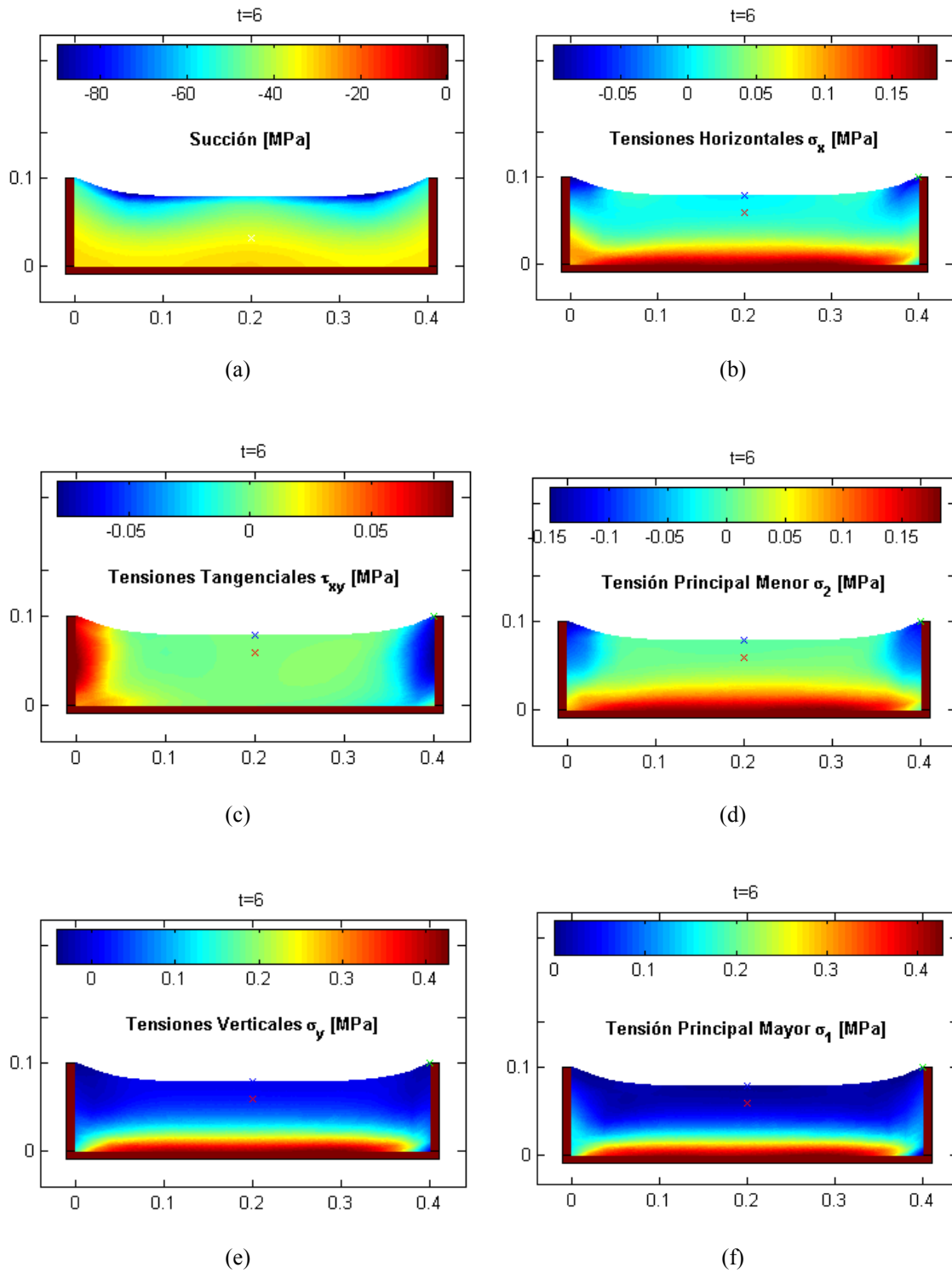


Figura 5.52 – Deformación del esquema CC14-PCA a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensión vertical; f) tensión principal mayor.

En la Figura 5.52c se presentan las tensiones tangenciales que indican que en la zona media de la muestra las tensiones horizontales y verticales son las principales, puesto que las tensiones tangenciales son nulas. En los extremos de la muestra, como ya se analizó previamente, las direcciones principales no son la horizontal y vertical aunque tampoco se desvían drásticamente, debido al pequeño valor de las tensiones tangenciales. Este cambio se debe a la forma que tiene el perfil de succión impuesto en el borde superior y a la deformación del contorno superior de la muestra.

La Figura 5.52d presenta la tensión principal menor en la sección diametral analizada. Este es el campo de tensiones que gobierna la formación de grietas cuando alcanza el valor de la resistencia a tracción del suelo. Es similar al campo de tensiones horizontales y muestra que las primeras grietas en producirse serán las de los bordes desde la superficie superior. La dirección de propagación es perpendicular a la tensión principal menor, la cual es aproximadamente vertical.

En la Figura 5.52e, se muestran las tensiones verticales que son mayores cuando son de compresión y menores cuando son de tracción respecto de la dirección horizontal (en valor absoluto). En la Figura 5.52f se presentan las tensiones principales mayores, las cuales son todas de compresión y aumentan con la profundidad. El punto de referencia azul, está en el medio del borde superior de la sección. El punto de referencia rojo está 2 cm debajo del punto azul. El punto de referencia verde está en la esquina superior derecha de la sección en el contacto con la bandeja contenedora (Figura 5.52).

En la Figura 5.53 se presentan las tensiones horizontales en función del tiempo y la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica en los puntos de referencia azul, rojo y verde. Se observa la evolución de las tensiones de tracción, línea azul y línea verde (compuesta por cruces). Considerando un valor de resistencia a tracción de 0.0035 MPa (Lakshmikantha, 2009) se puede comprobar que el modelo predice el inicio de agrietamiento el primer día del ensayo en los bordes en contacto con la bandeja. En el punto medio de la superficie superior, también se desarrollan tracciones que pueden provocar agrietamiento. El modelo predice el desprendimiento de la muestra respecto de la bandeja de una manera evidente. En cambio la formación de la grieta central podrá o no producirse en función de la evolución de la resistencia a tracción y de los campos de tensiones de tracción.

En la Figura 5.54a se presenta la evolución de la porosidad en el centro de la sección en estudio y en la Figura 5.54b se presentan los desplazamientos con el tiempo en los puntos de referencia azul, rojo y verde definidos arriba. Se comprueba que el punto verde tiene restringidos los desplazamientos como indica el esquema de la Figura 5.50a.

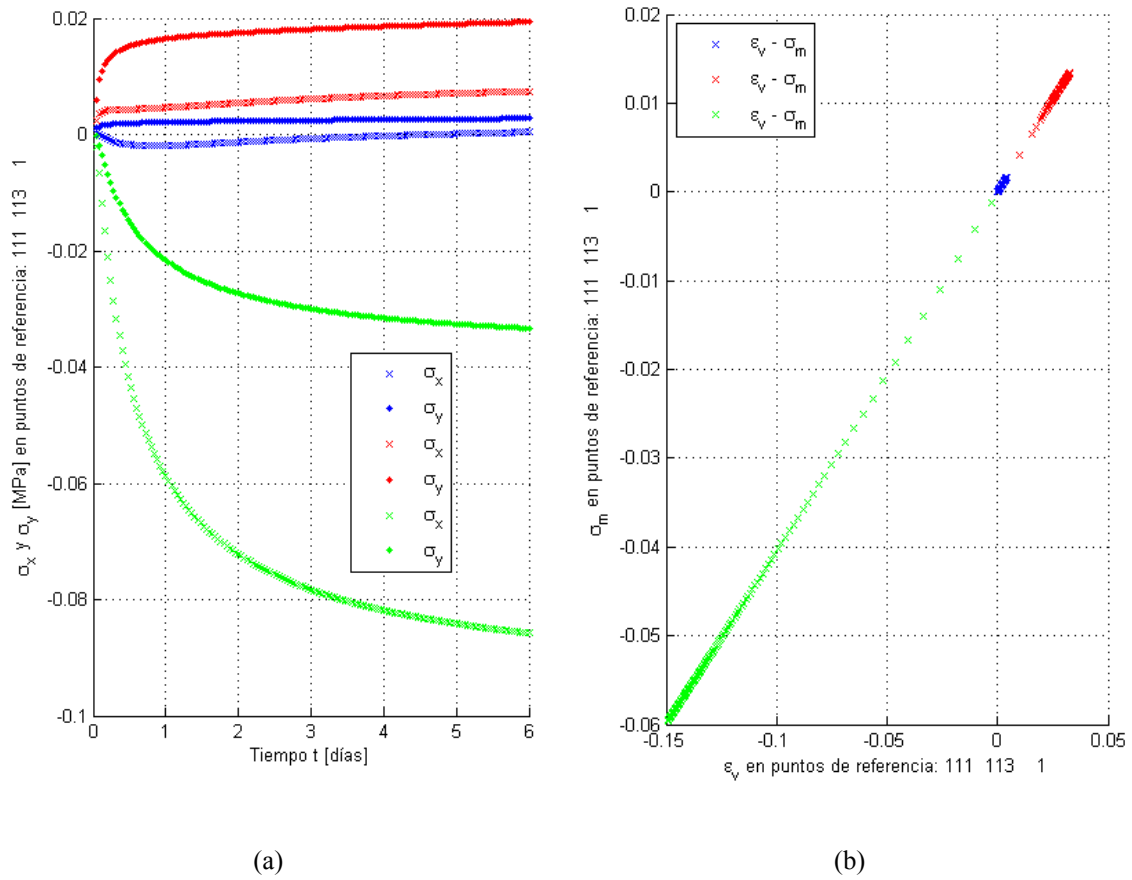


Figura 5.53 – Esquema CC14-PCA (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde):
 a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.2.6.2. Etapa 2: Análisis de Dsecación con el Esquema CC02b-PCA

El esquema del apartado anterior, CC14-PCA (Figura 5.50a), es válido para los primeros instantes del proceso y hasta el inicio de pérdida de adherencia con la bandeja contenedora o cuando comienza el agrietamiento. A partir del movimiento relativo entre muestra y bandeja, el esquema CC02b-PCA (Figura 5.50b) es más apropiado. A pesar de que esto implica que existe una grieta lateral, el suelo permanece en contacto con la pared de la bandeja, evitando que la succión afecte a los laterales de la muestra.

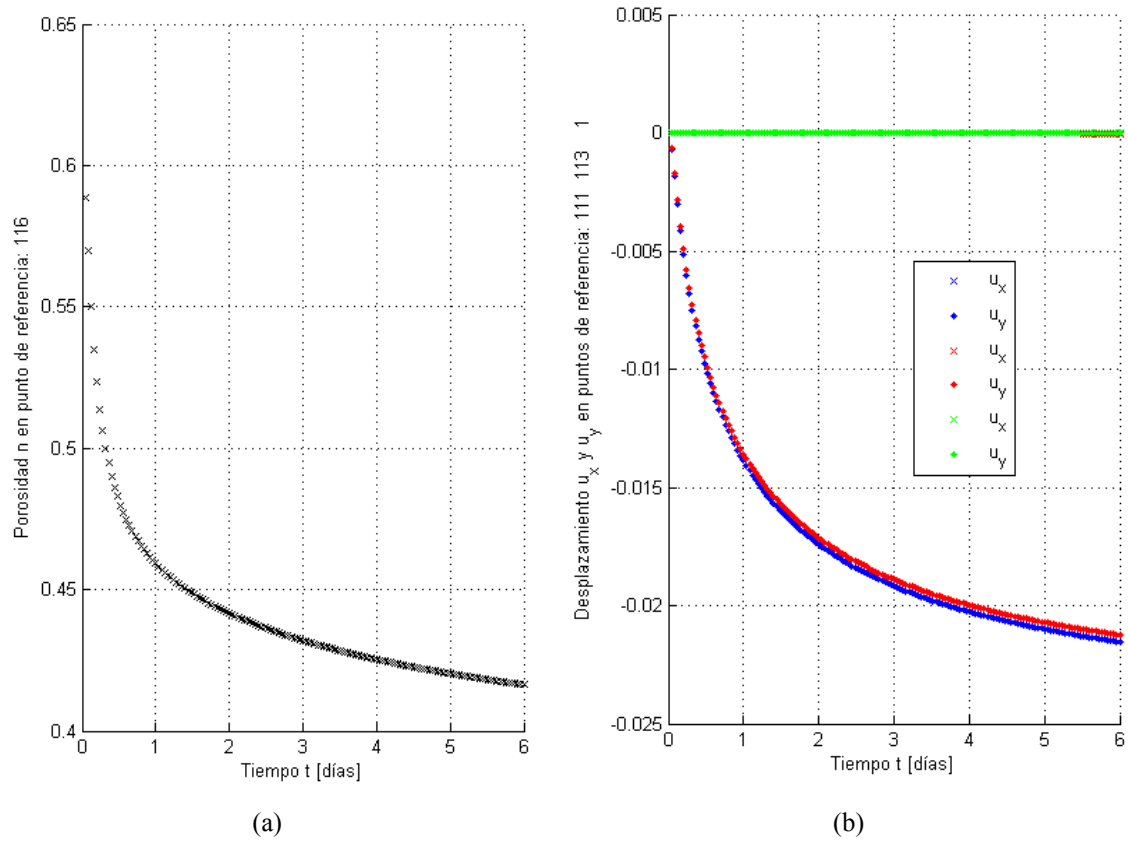


Figura 5.54 – Esquema CC14-PCA: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos u_x y u_y en puntos de referencia azul, rojo y verde.

Con el esquema CC02-PC01 (Figura 5.8c), estudiado en un apartado anterior, se considera una imposición de succión constante en el contorno superior. Con este esquema no se han obtenido tracciones con las cuales se pueda justificar la aparición de grietas en los contornos o en el interior de la masa de suelo.

Sin embargo, la aplicación no uniforme de la condición de contorno en succión como en este caso, ha modificado el perfil del campo de succiones como se ve en la Figura 5.55a (al final de la simulación de 6 días de secado), y aunque de valor pequeño ahora si hay ciertas tensiones de tracción en el centro de la bandeja, con los máximos en el centro del contorno superior Figura 5.55b.

El campo de succión no tiene en este caso un comportamiento unidimensional, como en el esquema CC02-PC01 y presenta gradientes de succión en la dirección vertical y horizontal. Esto indica que para ciertas condiciones de contorno en succión de características no uniformes es posible justificar el agrietamiento en el centro de la muestra.

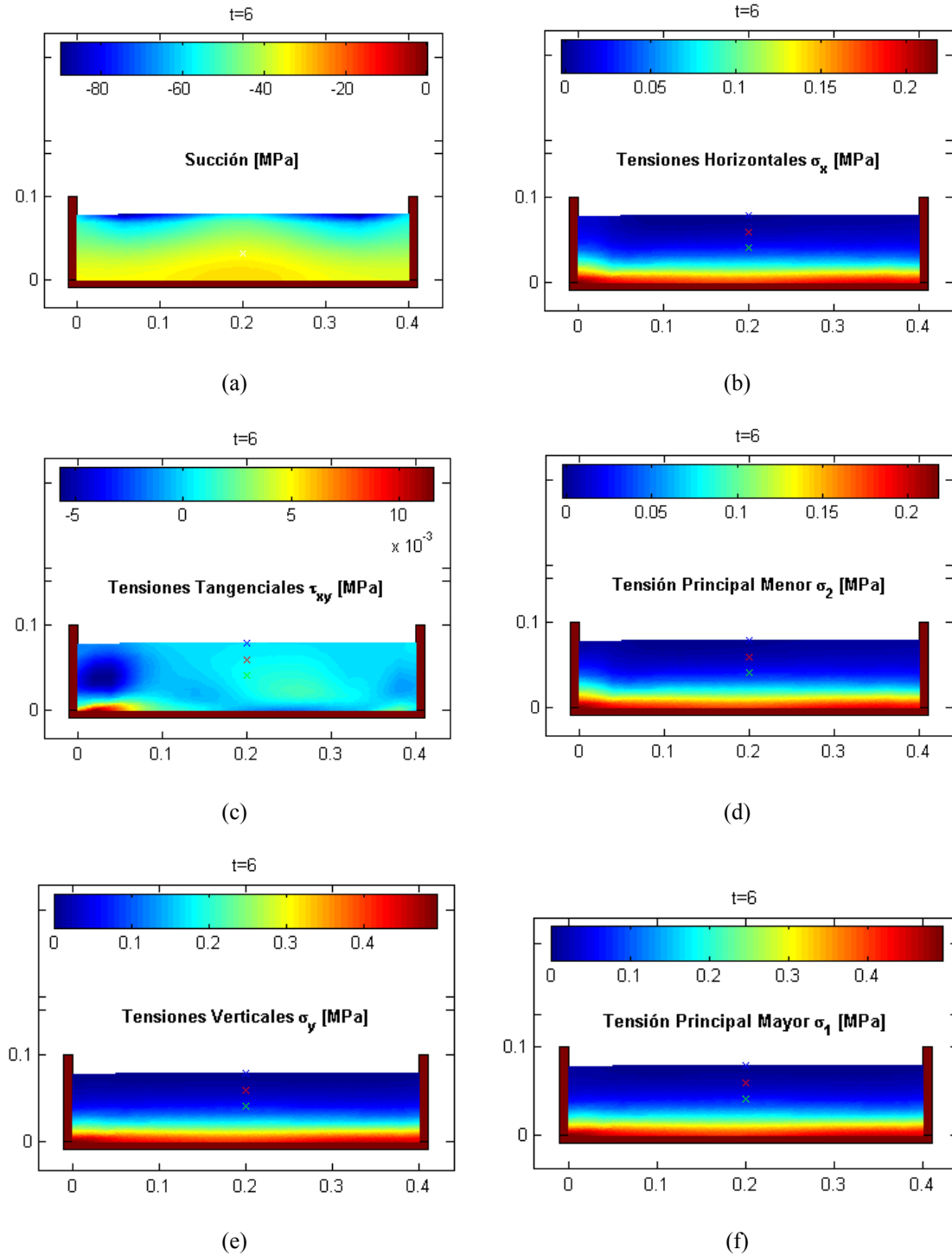


Figura 5.55 – Deformación del esquema CC02b-PCA a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensión vertical; f) tensión principal mayor.

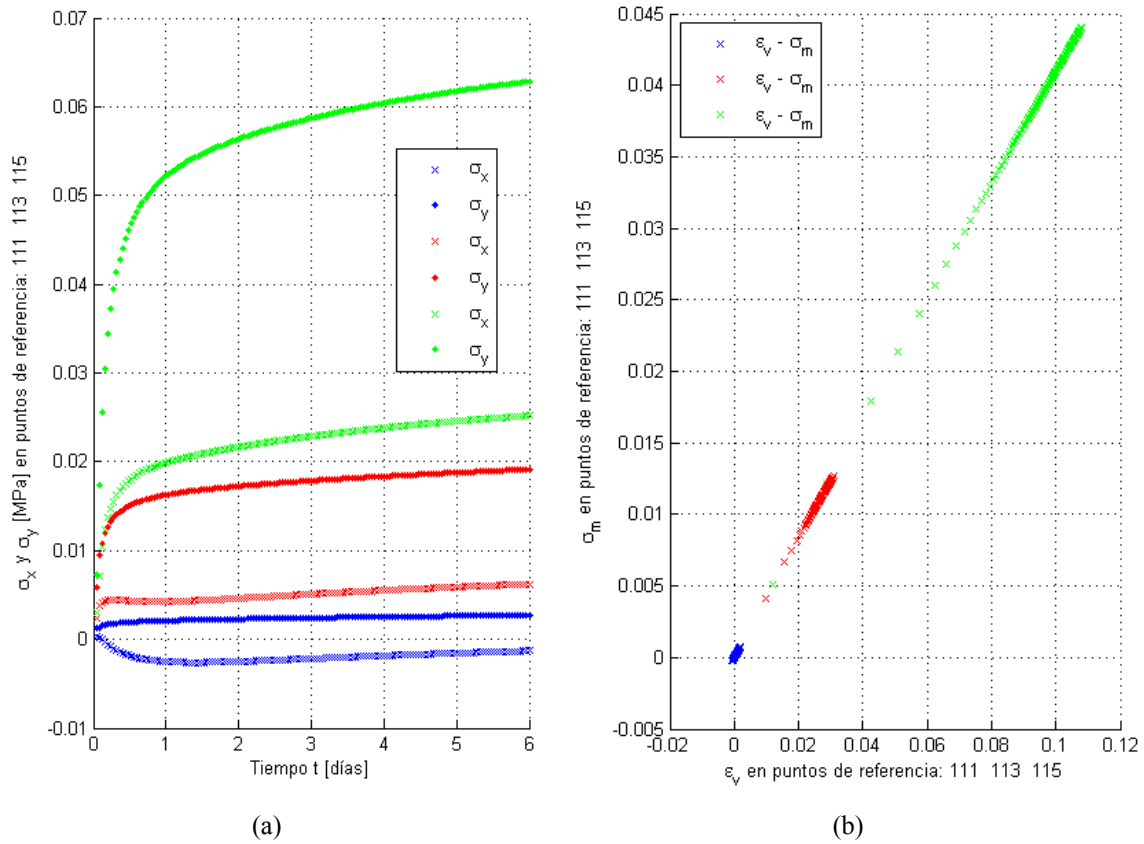


Figura 5.56 – Esquema CC02b-PCA (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde):
a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs de-
formación volumétrica.

La condición de contorno adoptada en este caso origina tensiones de compresión horizontales en el contacto entre bandeja y suelo que van aumentando con la profundidad (Figura 5.55b).

Las tensiones tangenciales son pequeñas (Figura 5.55c) comparadas con las tensiones normales, lo cual indica que en este caso las tensiones horizontales y verticales son prácticamente las principales. Esto puede comprobarse en la Figura 5.55d, donde se observa el campo de tensiones principales menores que es idéntico al campo de tensiones horizontales. La tensión horizontal, que es la principal menor, induce al agrietamiento y de producirse se propaga en dirección vertical perpendicular a la tensión principal menor.

En la Figura 5.55e se presenta la distribución de las tensiones verticales, que son de compresión y aumentan hacia el fondo de la muestra, siendo mayores que las tensiones horizontales.

En la Figura 5.55f se presenta el campo de tensiones principales mayores que son de compresión, aumentan con la profundidad.

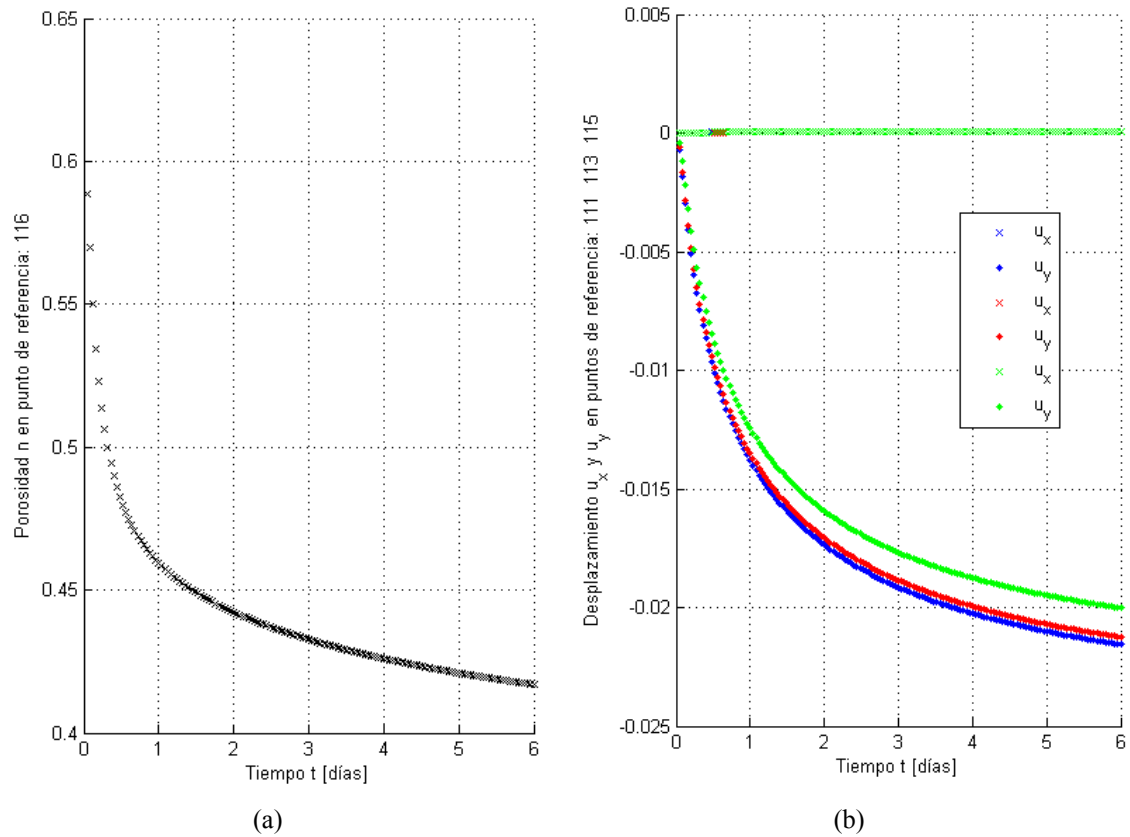


Figura 5.57 – Esquema CC02b-PCA: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.

En este último caso las tensiones principales mayores son prácticamente las verticales.

En la Figura 5.56 se presentan la evolución de las tensiones horizontales y verticales en los puntos de referencia mostrados en las Figura 5.55 (todos en la vertical del centro de la sección diametral). Se observa que en el punto central del borde superior de la sección diametral se producen tensiones de tracción que superan la resistencia a tracción del suelo durante el primer día de simulación.

En la Figura 5.56b se presenta la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica, en los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde en las Figura 5.55). Las variables del modelo evolucionan hacia un estado de equilibrio con valores asintóticos.

En la Figura 5.57 se presentan la evolución de la porosidad en el punto central de la sección diametral de la muestra y la evolución de los desplazamientos en función del tiempo en los tres puntos de referencia azul, rojo y verde.

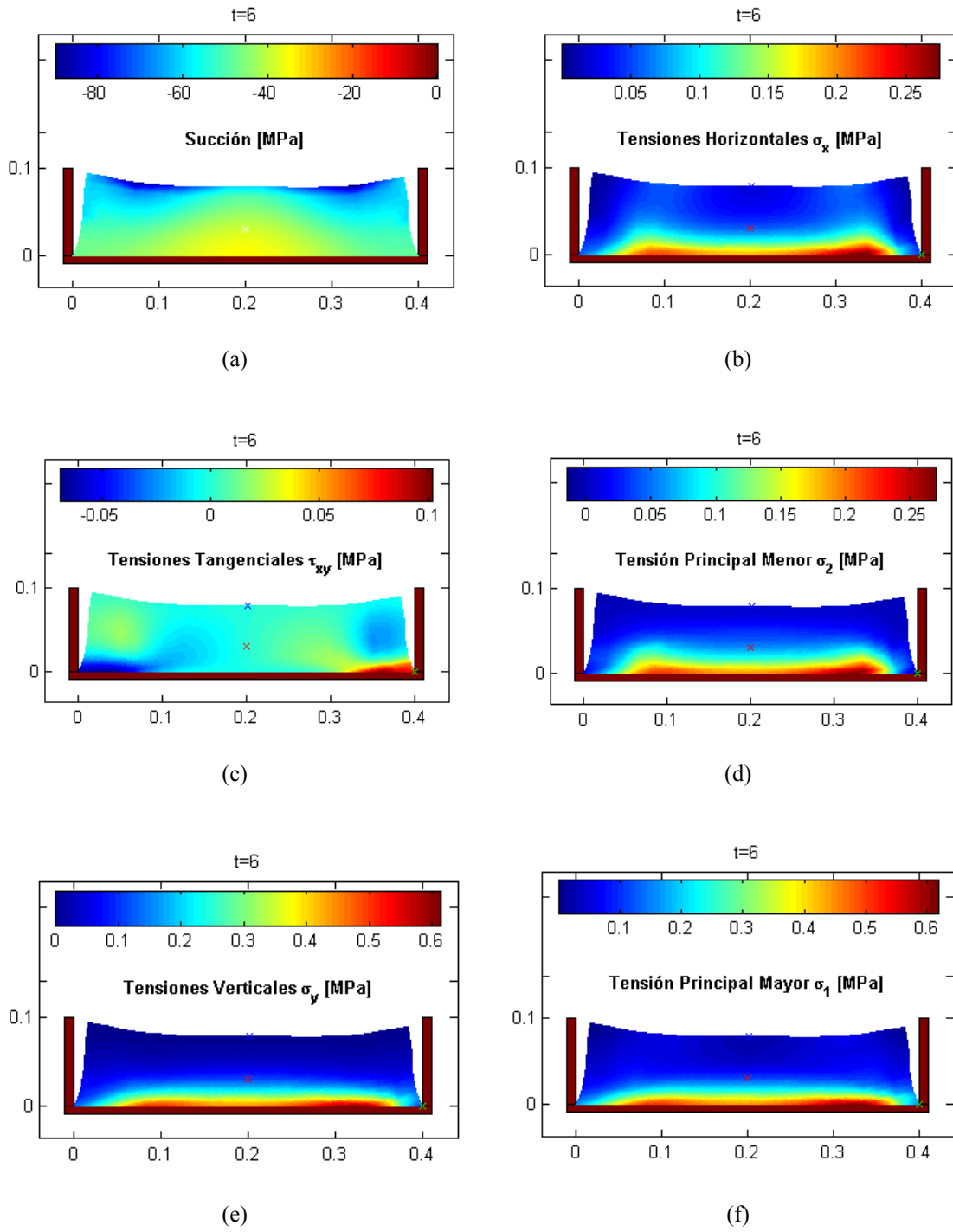


Figura 5.58 – Deformación del esquema CC18-PCB a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.

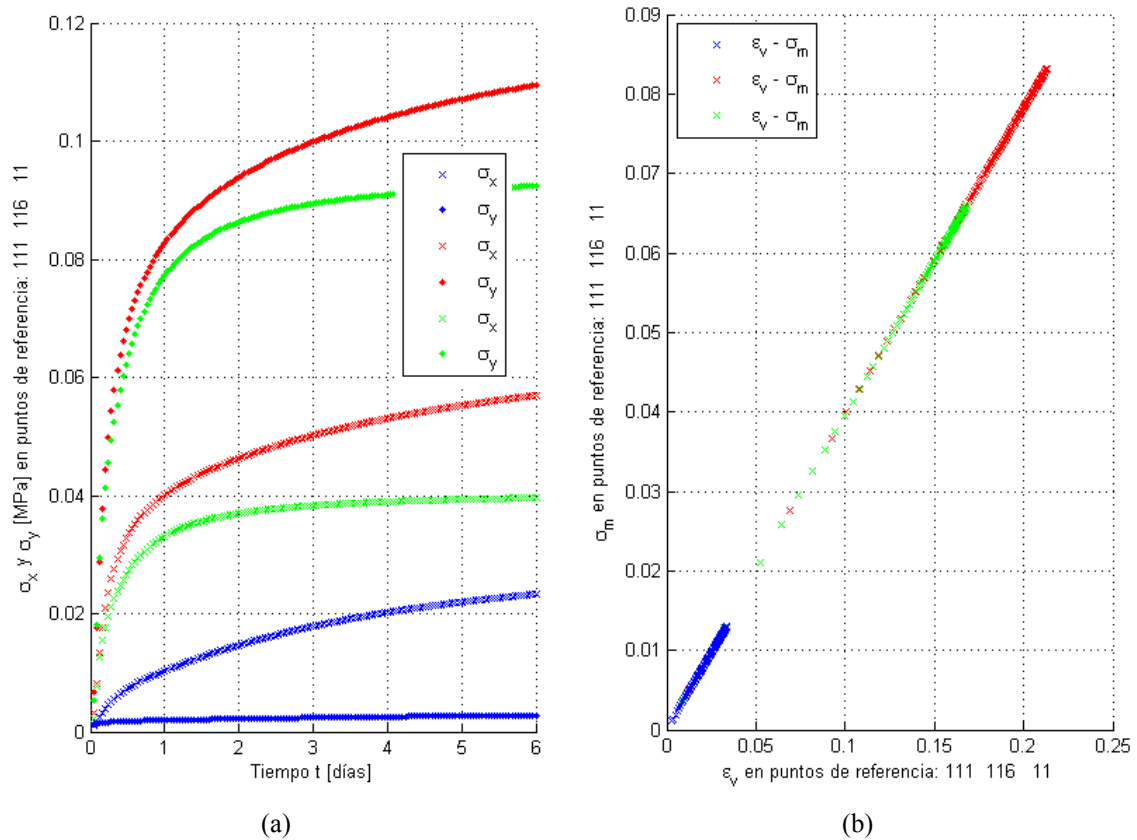


Figura 5.59 – Esquema CC18-PCB (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde):
 a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.2.6.3. Etapa 3: Análisis de Deseccación con Esquema CC18-PCB

El esquema CC02b-PCA (Figura 5.50b) deja de ser apropiado una vez que la grieta lateral aumenta de tamaño y permite al ambiente imponer succión en los contornos. En este apartado y en el siguiente se analizan los esquemas CC18-PCB y CC18-PCC (Figura 5.50c y d), que tienen en cuenta la imposición de succión en los laterales de la muestra. Se analizan dos etapas para tener en cuenta que la grieta lateral se propaga de arriba hacia abajo en el laboratorio, y se comparan ambos esquemas. En la Figura 5.58a se presenta el campo de succión obtenido con el esquema CC18-PCB, que está afectado por la deformación del suelo lo cual produce cambios en los campos de tensiones. Las tensiones horizontales se observan en la Figura 5.58b.

En la Figura 5.58c se muestran las tensiones tangenciales en el plano XY, que indican que las tensiones horizontales y verticales no son las principales en este caso. En la Figura 5.58d se muestra el campo de tensiones principales menores, sin tracciones en la sección diametral.

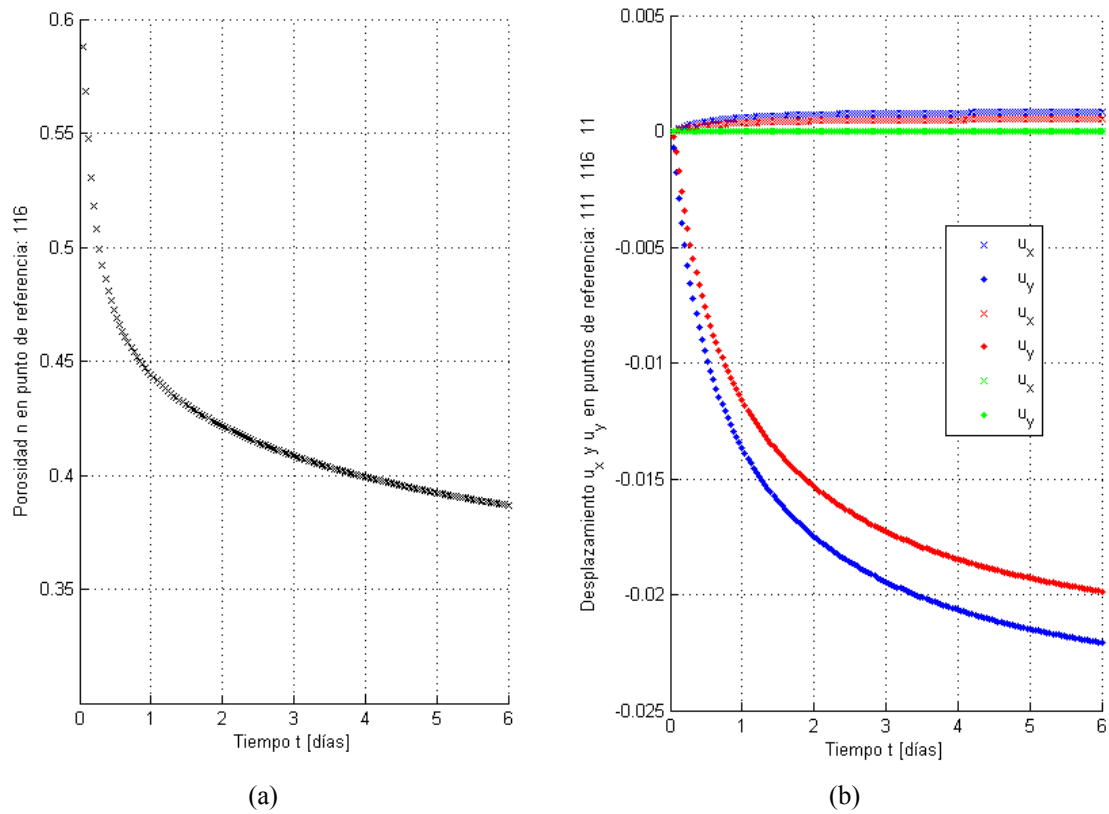


Figura 5.60 – Esquema CC18-PCB: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.

En la Figura 5.58e y f se presentan las tensiones verticales y la tensión principal mayor. Se comprueba que a pesar de no ser principales las tensiones horizontales y verticales no son muy diferentes de las principales debido a que la muestra no presenta grandes deformaciones.

En la Figura 5.59a se muestra la evolución de las tensiones en los tres puntos de referencia mostrados en la Figura 5.58 (azul en el medio del borde superior de la sección, rojo en el medio de la sección y verde en la esquina inferior derecha de la sección). No se observan tensiones de tracción que puedan producir agrietamiento.

En la Figura 5.59b se muestra la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica en los tres puntos de referencia.

En la Figura 5.60 se presentan la evolución de la porosidad en el centro de la sección en estudio y la evolución de los desplazamientos en los tres puntos de referencia definidos arriba.

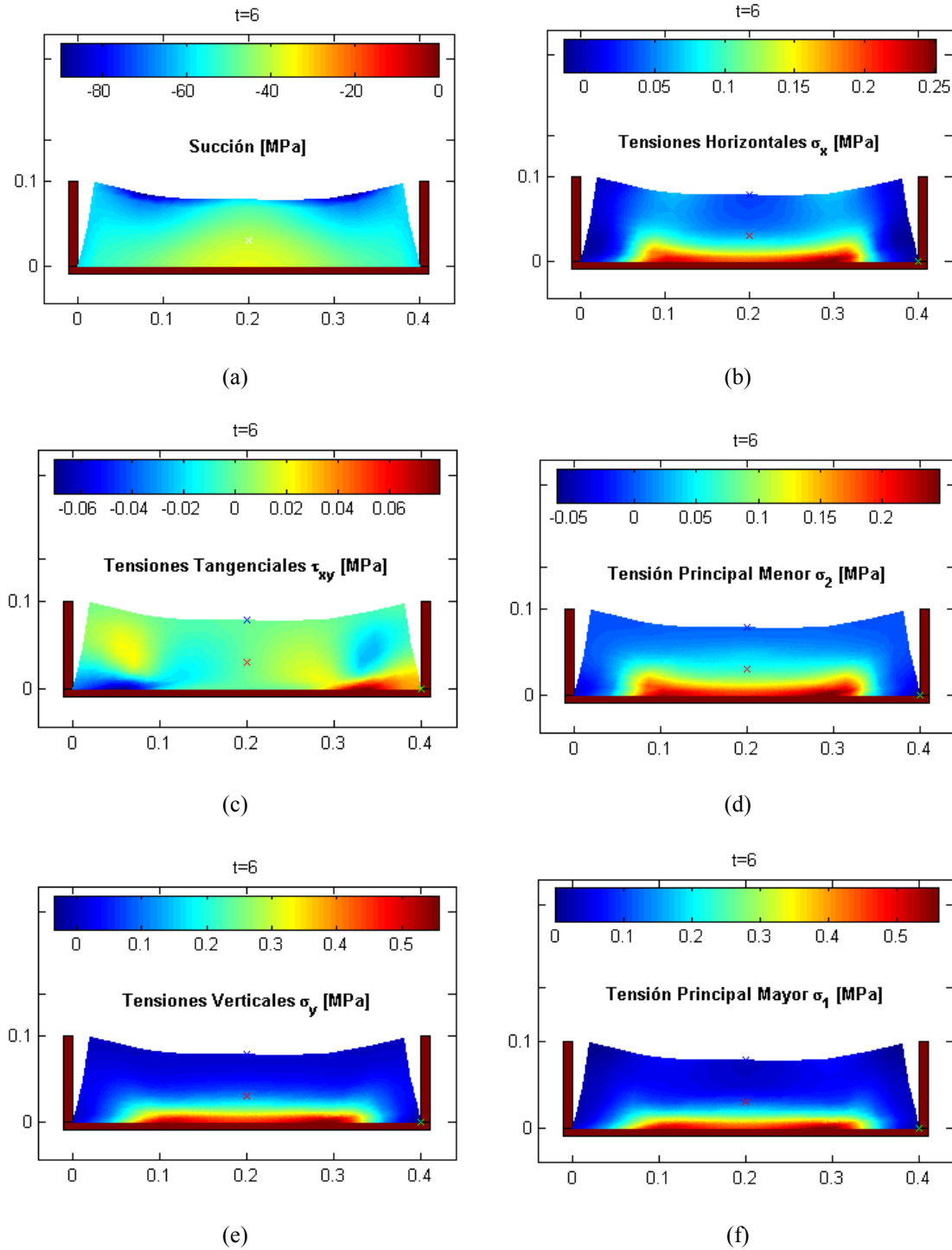


Figura 5.61 – Deformación del esquema CC18-PCC a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.

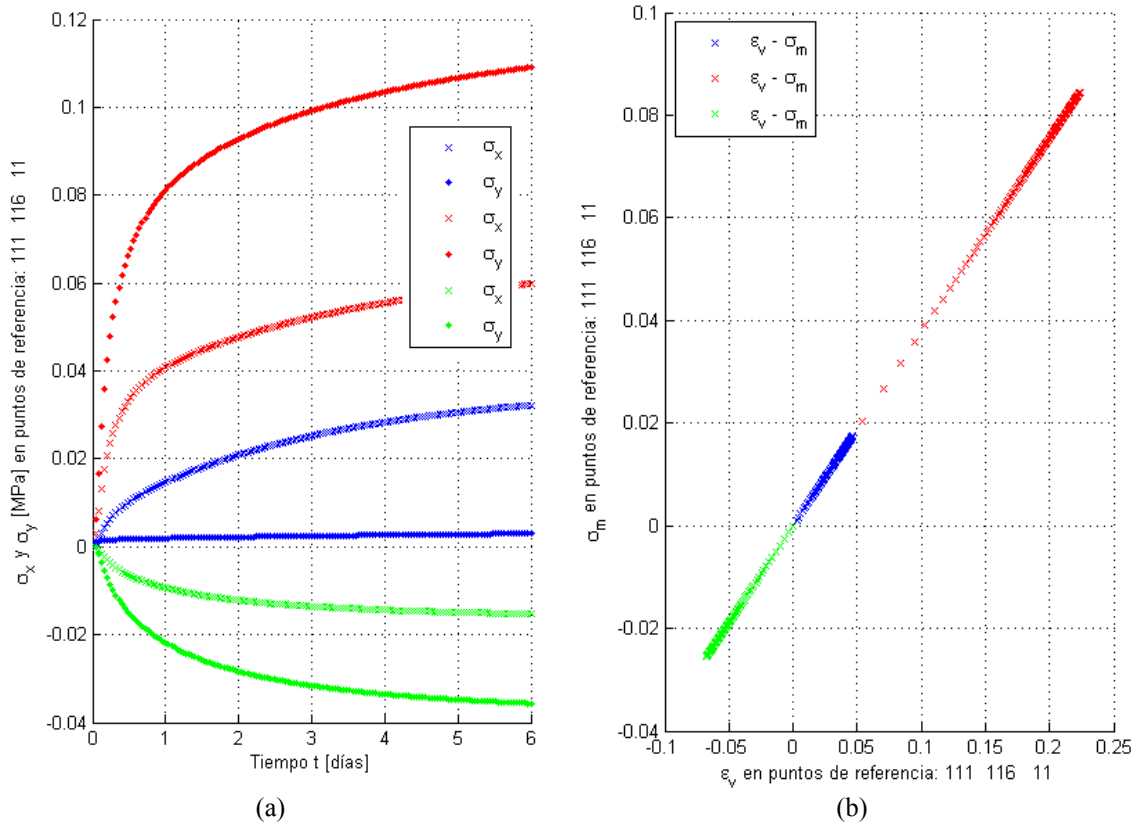


Figura 5.62 – Esquema CC18-PCC (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde): a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.2.6.4. Etapa 4: Análisis de Dsecación con Esquema CC18-PCC

A medida que la grieta lateral aumenta de tamaño y se propaga hacia el fondo, la imposición de succión en el contorno será más extendida en el lateral de la muestra. En este caso, el esquema CC18-PCC (Figura 5.50d) es el más apropiado.

En la Figura 5.61a se presenta el campo de succión a los 6 días de simulación de dsecación. Con respecto al esquema anterior, CC18-PCB (Figura 5.50c), no hay mucha diferencia y sucede lo mismo de antes, los campos de tensiones se ven afectados por la distorsión que se produce sobre el campo de succión debido a la deformación y a la imposición de una condición de contorno no uniforme.

En la Figura 5.61b se presenta el campo de tensiones horizontales que es esencialmente de compresión.

En la Figura 5.61c se presentan las tensiones tangenciales en el plano XY, que muestran valores relativamente importantes en las esquinas inferiores de la sección. Esto indica que las tensiones en dichas zonas no serán las principales.

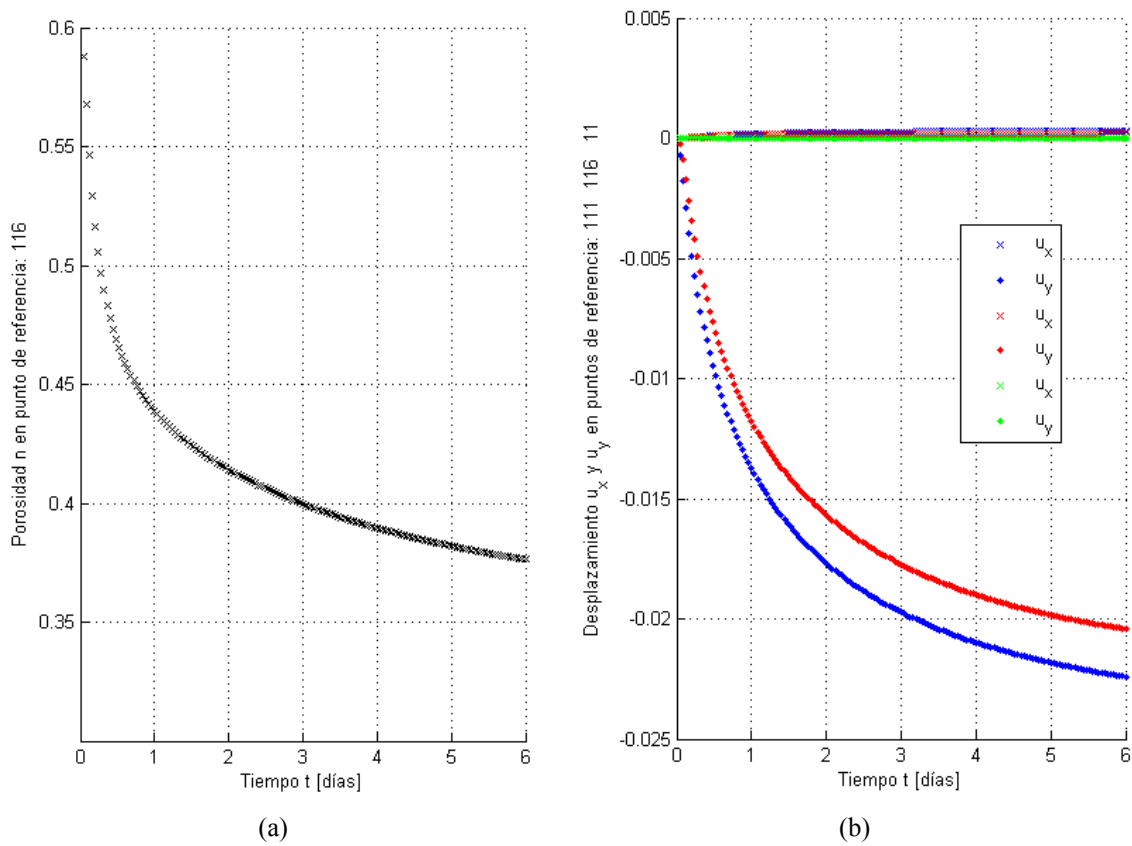


Figura 5.63 – Esquema CC18-PCC: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.

En la Figura 5.61d se presenta el campo de tensiones principales menores que muestran tracciones en las esquinas inferiores. Al extender la aplicación de la succión en todo el contorno se producen tracciones considerables que pueden desprender el suelo del fondo de la bandeja por un efecto de arqueado que se observa en el laboratorio.

En la Figura 5.61e se presenta el campo de tensiones verticales que es de compresión y aumenta con la profundidad.

En la Figura 5.61f se presenta el campo de tensiones principales mayores que es similar en valores al campo de tensiones verticales.

En la Figura 5.62 se presentan la evolución de las tensiones en los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde de la Figura 5.61) y la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica. Se observa que en la esquina inferior derecha de la sección se desarrollan tensiones de tracción verticales mayores que las horizontales que pueden producir agrietamiento en el transcurso del primer día de simulación de desecación.

En la Figura 5.63 se presenta la evolución de la porosidad en el centro de la sección diametral y la evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia.

5.4.2.6.5. Etapa 5: Análisis de Dsecación con Esquema CC18-PCD

En el ensayo de secado rápido, después de la formación de la grieta lateral se ha producido una grieta central que ha surgido en el centro de la muestra y se ha propagado hacia lados opuestos hasta alcanzar los bordes (Figura 5.47). Para esta etapa del ensayo un esquema como el CC18-PCD (Figura 5.50e) parece más apropiado que los anteriores, sobre todo si se pretende estudiar la influencia de esta grieta central en el proceso de desecación.

En la Figura 5.64a se presenta el campo de succión a los 6 días de desecación. Se observa la forma particular que adopta dicho campo debido a que las condiciones de contorno en succión que se aplican ahora es no uniforme en el borde superior y constante en los bordes laterales y en la grieta que tiene una profundidad de 5 cm en este caso. Se observa que, en comparación con los casos anteriores, el suelo es más rígido debido a las condiciones de contorno en succión que lo hacen evolucionar más deprisa, con lo cual se rigidiza más rápidamente.

En la Figura 5.64b se presenta el campo de tensiones horizontales que son de compresión y con cierta concentración de tensiones en la punta de la grieta.

En la Figura 5.64c se presenta el campo de tensiones tangenciales en el plano XY, que son de pequeño valor, lo cual indica que las direcciones horizontales y verticales son prácticamente las principales.

En la Figura 5.64d se presenta el campo de tensiones principales menores, la similitud con el campo de tensiones horizontales confirma que estas son prácticamente las principales.

En la Figura 5.64e se presenta el campo de tensiones verticales que son de compresión y aumentan con la profundidad.

En la Figura 5.64f se presenta el campo de tensiones principales mayores, muy similar al campo de tensiones verticales que en este caso es principal.

En la Figura 5.65 se presenta la evolución de las tensiones en los puntos de referencia (azul, rojo y verde de las Figura 5.64) y la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica.

En la Figura 5.66 se presenta la evolución de la porosidad en el centro de la sección y la evolución de los desplazamientos en función del tiempo en los puntos de referencia.

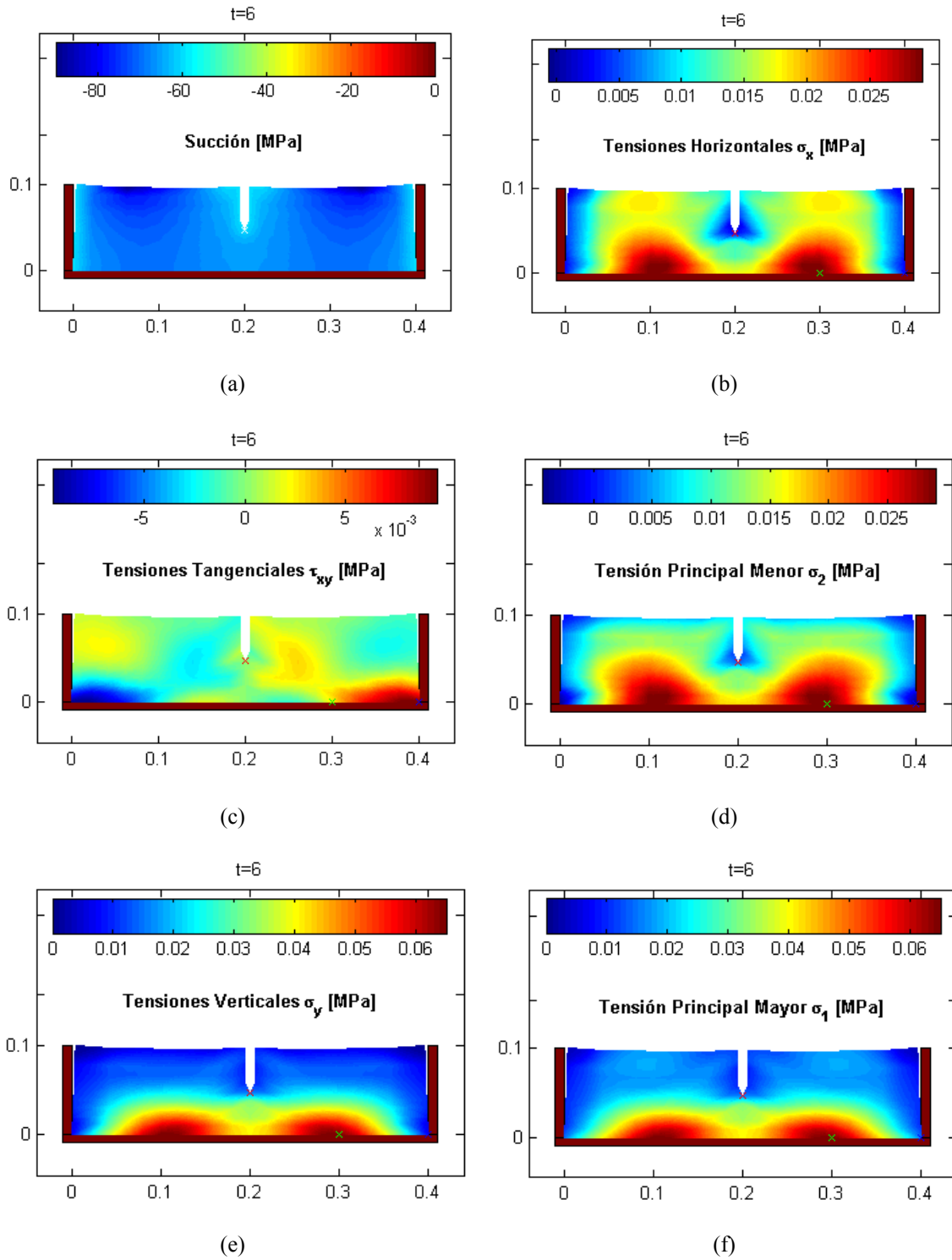


Figura 5.64 – Deformación del esquema CC18-PCD a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.

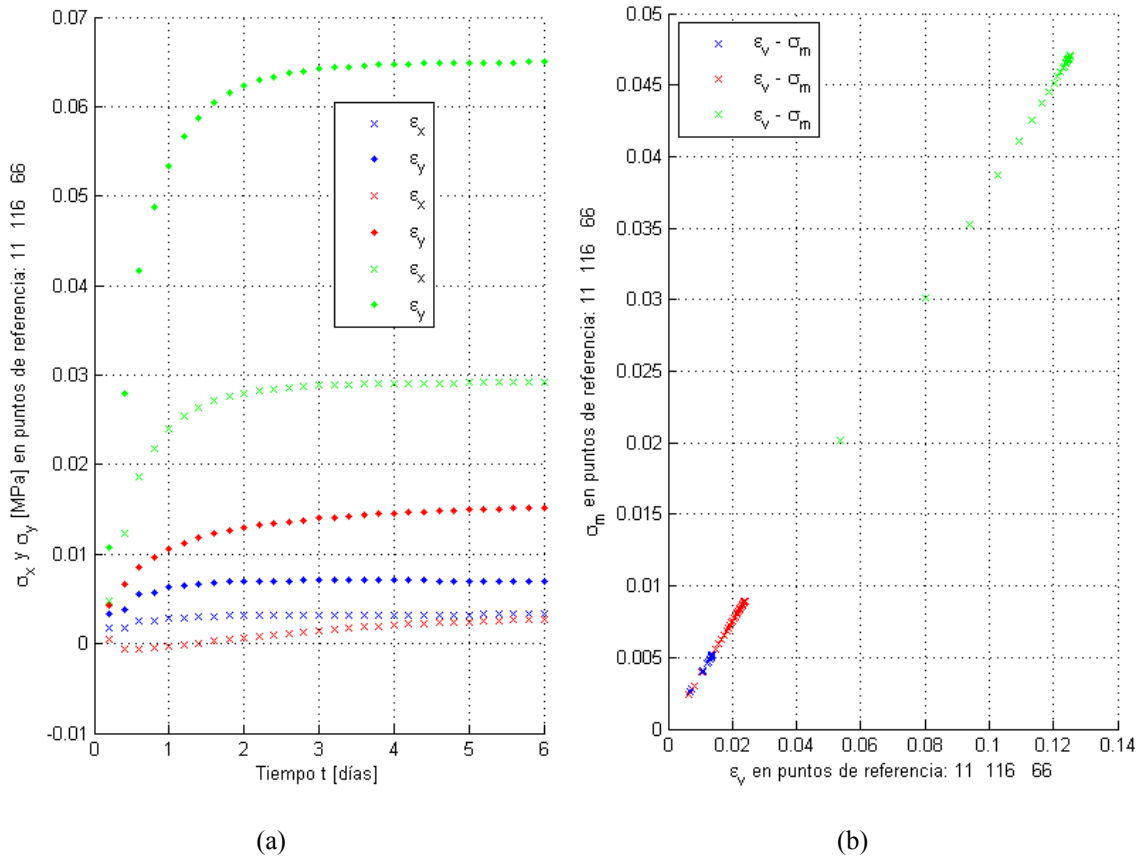


Figura 5.65 – Esquema CC18-PCD (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde):
a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.2.6.6. Etapa 6: Análisis de Deseccación con Esquema CC18-PCE

En el ensayo de secado rápido la grieta central se propagó a lo largo de toda la altura de la muestra y alcanzó los laterales dividiendo en dos porciones a la muestra cilíndrica original. De esta forma se han obtenido una grieta en todo el contorno y una grieta central que son de Tipo 1.

Además, se produjeron grietas curvas, no verticales, que se propagaron solo una parte de la altura de la muestra desde el fondo y hacia arriba en direcciones verticales y oblicuas (Figura 5.48c). Estas grietas son las de Tipo 2.

Para este caso el esquema CC18-PCE (Figura 5.50f) parece el más apropiado puesto que incluye una grieta central que abarca casi toda la altura de la muestra y deja libre el contorno de la sección en contacto con la bandeja. Además, se aplica la succión a todos los contornos y a la grieta central.

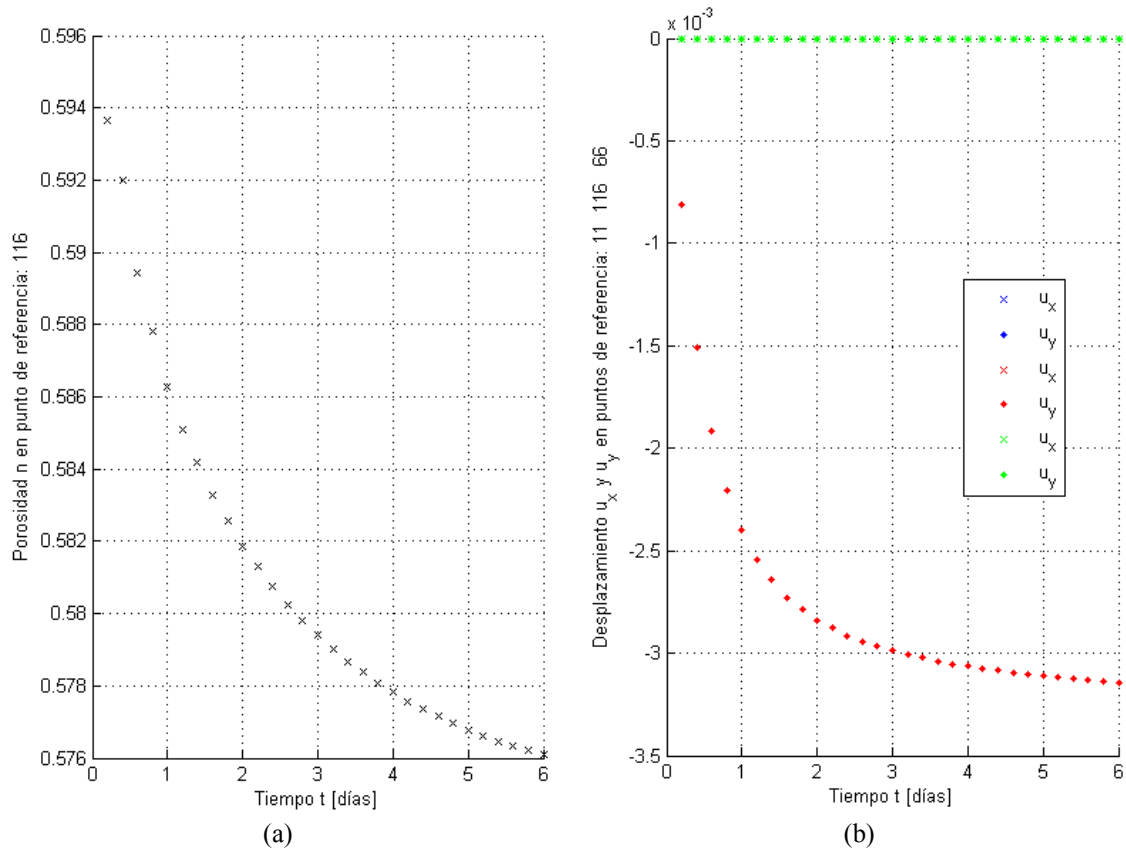


Figura 5.66 – Esquema CC18-PCD: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.

En la Figura 5.67a se presenta el campo de succión a los 6 días de desecación. Se observa la forma particular que adopta dicho campo debido a que las condiciones de contorno en succión que se aplican ahora, no uniforme en el borde superior y constantes en los bordes laterales y en la grieta, que tiene una profundidad de 9 cm en este caso. Se observa que en comparación con los casos anteriores, el suelo es más rígido debido a las condiciones de contorno en succión que lo hacen evolucionar más deprisa con lo cual se rigidiza más rápidamente. No se presentan grandes diferencias con el esquema anterior CC18-PCD (Figura 5.50e).

En la Figura 5.67b se presenta el campo de tensiones horizontales que son de compresión y con cierta concentración de tensiones en la punta de la grieta.

En la Figura 5.67c se presenta el campo de tensiones tangenciales en el plano XY, de valores muy pequeños comparado con las tensiones normales, lo cual indica que las tensiones horizontales y verticales son prácticamente las principales en este caso.

En la Figura 5.67d se presenta el campo de tensiones principales menores, que es muy similar al campo de tensiones horizontales por ser este prácticamente el principal.

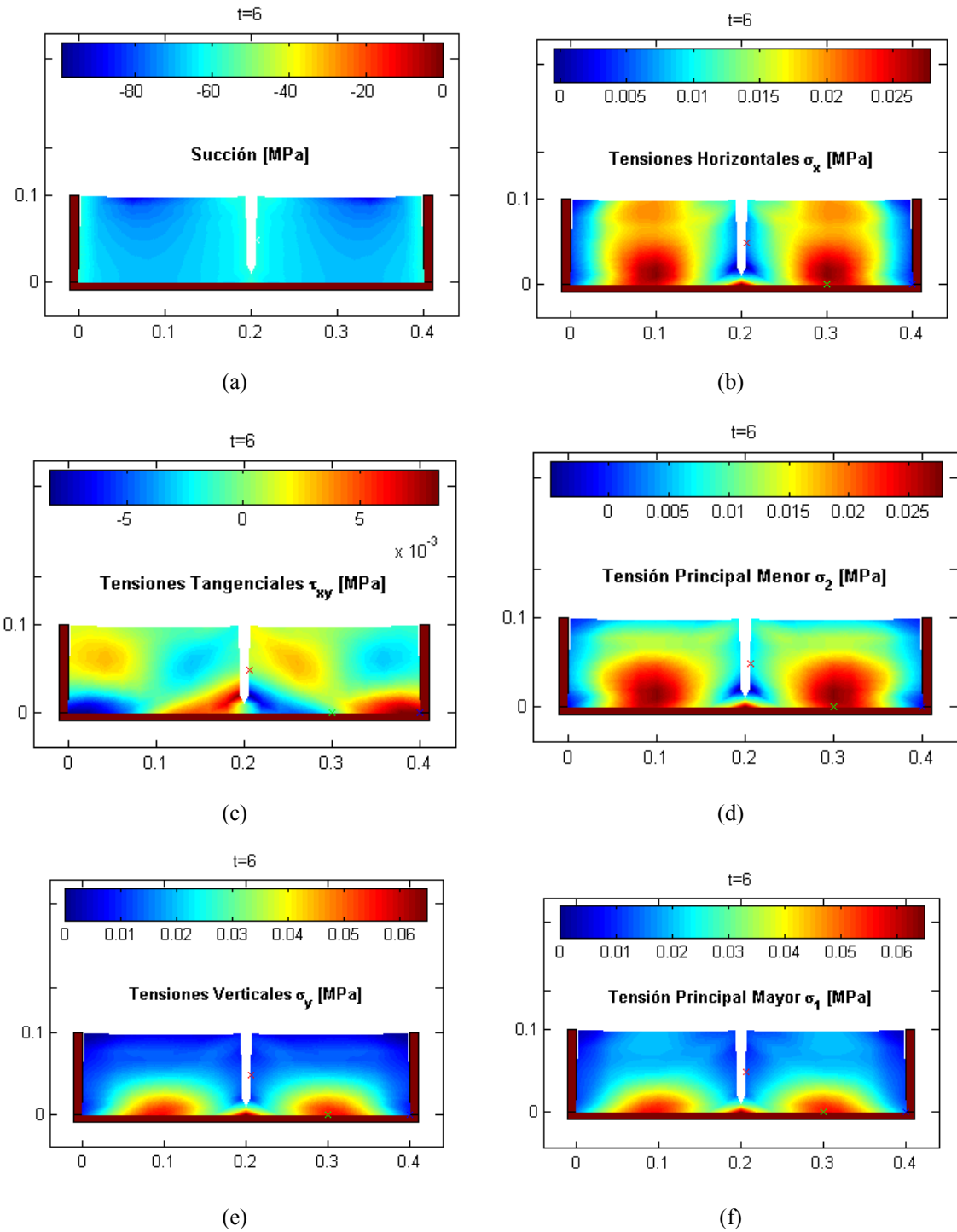


Figura 5.67 – Deformación del esquema CC18-PCE a seis días de secado:
a) succión; b) tensión horizontal; c) tensión tangencial en el plano XY; d) tensión principal menor; e) tensiones verticales; f) tensión principal mayor.

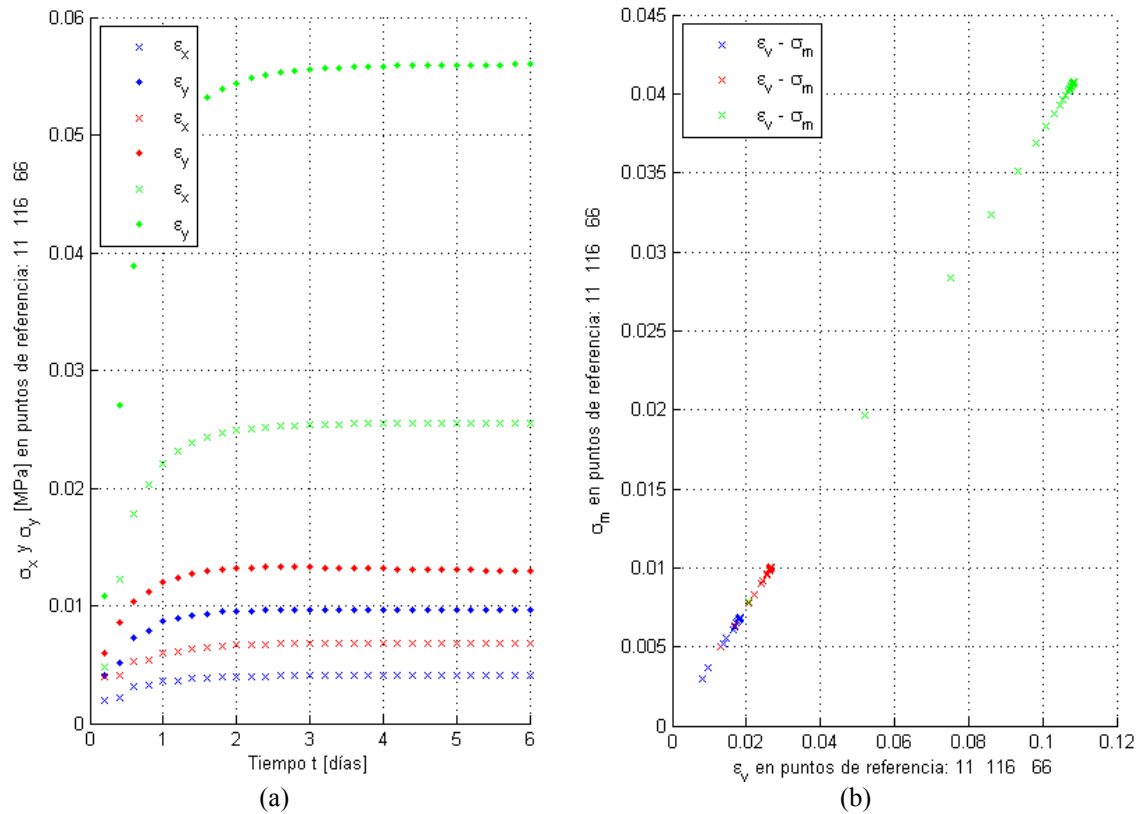


Figura 5.68 – Esquema CC18-PCE (datos en los puntos de referencia azul, rojo y verde):
a) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

En la Figura 5.67e se presenta el campo de tensiones verticales, de compresión y aumentando con la profundidad.

En la Figura 5.67f se presenta el campo de tensiones principales mayores que es prácticamente el mismo que el vertical.

En la Figura 5.68 se presenta la evolución de las tensiones en los puntos de referencia (azul, rojo y verde de la Figura 5.67) y la relación entre la tensión media y la deformación volumétrica.

En la Figura 5.66 se presenta la evolución de la porosidad en el centro de la sección y la evolución de los desplazamientos en función del tiempo en los puntos de referencia.

5.4.2.7. Discusión de Resultados del Análisis de Dsecación de Muestras de 40 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

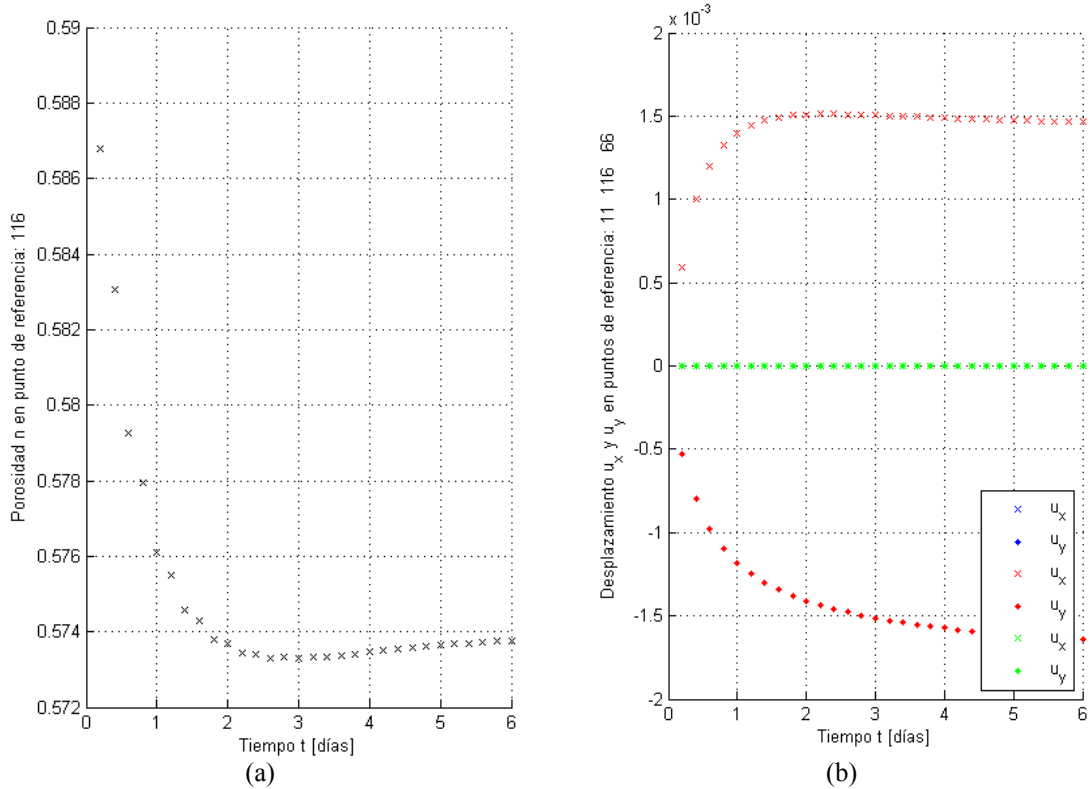


Figura 5.69 – Esquema CC18-PCD: a) evolución de la porosidad con el tiempo en el punto central de la sección; b) evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia: azul, rojo y verde.

Todas las simulaciones se realizaron considerando un tiempo de ensayo de 6 días que se corresponde con el ensayo de laboratorio. Como se ha podido ver, en todas las simulaciones la deformación calculada es del mismo orden de magnitud que la obtenida en el laboratorio (Retracción vertical: 16-17 mm en el centro, 11-15 mm en el borde). Esto indica un buen funcionamiento de la ecuación constitutiva mecánica y la posibilidad de un calibrado relativamente sencillo cuando sea necesario.

Una vez analizados los esquemas presentados en este apartado se llega a la conclusión que el esquema CC14-PCA es el más adecuado para el inicio del proceso porque predice la formación de grietas en el contorno desde la superficie superior y la grieta central. La alternativa a este esquema es el CC02b-PCA, que ha podido reproducir la grieta central con mayor contundencia, ya que los valores de tracción fueron mayores con este esquema. Mientras no se puedan flexibilizar las condiciones de contorno, la elección dependerá de qué se quiera estudiar.

El esquema CC18-PCC parece muy adecuado para el proceso una vez desarrollada la grieta lateral.

Podrían usarse solo 4 esquemas que son los más representativos: CC14-PCA, CC02b-PCA, CC18-PCC y CC18-PCE, puesto que los resultados del esquema CC18-PCD fueron muy similares al CC18-PCE. Además, el esquema CC18-PCB no produjo tensiones de tracción.

Una elección inadecuada de las condiciones de contorno resulta en simulaciones que no predicen lo que sucede en laboratorio. La elección no es obvia hasta que se conoce como evoluciona el proceso.

En general se puede decir que los esquemas anteriores representan por separado una parte de lo que ocurre durante el ensayo. Es interesante el hecho de que cada esquema justifica condiciones propicias para el agrietamiento en el borde y en el centro de la sección diametral estudiada. El esquema numérico más adecuado será la combinación de los anteriores y que vayan evolucionando con el tiempo. Esto es precisamente lo que da complejidad a este proceso y hace difícil su simulación con esquemas sencillos como los presentados hasta aquí. Resulta evidente la necesidad de simular el proceso de agrietamiento durante el proceso de secado. Este proceso se presenta en un apartado posterior.

Está claro que la succión que impone el ambiente actúa en la superficie de la muestra desde el minuto cero de un ensayo, ya que el ambiente está en contacto con la muestra desde el primer momento. De hecho el ambiente ya actúa sobre la muestra durante la preparación del lodo fluido para realizar el ensayo. La formación de las grietas requiere de cierto tiempo con lo cual la succión del ambiente actúa sobre los nuevos contornos una vez que la grieta se ha desarrollado. Como existe un patrón jerárquico (Lakshmikantha, et al., 2013), hay grietas que se producen en los primeros instantes (grietas en el contorno) y otras que se producen más tarde. Mientras las grietas evolucionan, evoluciona también el problema hidráulico en el interior de la masa de suelo. La influencia de las grietas en el proceso de secado será mayor cuanto antes se produzcan. En las mediciones de laboratorio no queda clara la influencia de las grietas en la desecación puesto que no se ve ninguna variación apreciable en las mediciones de los sensores a medida que se suceden las grietas. Solo se ha notado su influencia en el caso de que la grieta esté justo encima de algún sensor.

Otra cuestión importante es que ninguno de los esquemas ha predicho agrietamiento en otros lugares que no sean los bordes y el centro. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una vez comience el agrietamiento se perderá la simetría con la que se ha trabajado en todos estos esquemas, por lo tanto no se puede especular aquí respecto de lo que pasaría bajo condiciones de contorno diferentes sin realizar el análisis numérico correspondiente.

Cabe comentar además que ensayos de este tipo, donde se pueden controlar el advenimiento de las grietas y que permiten lograr un patrón de agrietamiento simple (una grieta principal en el centro) son en extremo útiles para calibrar modelos relativamente sencillos como el que se presenta aquí.

Debería repetirse este ensayo varias veces utilizando bandejas con el fondo liso para evitar el patrón de grietas complejo del fondo. De esta forma se podría asegurar que se tiene el control en cuanto al tipo de grieta que aparece después del secado rápido y se podrían simular los distintos ensayos para asegurar que se están considerando todas las variables del problema.

Otro punto importante que hay que controlar en los ensayos es la condición de contorno en desplazamientos para determinar el grado de su influencia sobre el patrón de agrietamiento.

5.4.3. Análisis de la Dsecación de Muestras de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

En el Capítulo 3, Análisis Experimental, se ha hecho un ensayo de secado sobre una muestra cilíndrica de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, para analizar la viabilidad del uso de un sistema de Georadar para la auscultación de muestras de suelo y la detección de grietas no visibles en la superficie. Lakshmikantha (2009) ha presentado dos ensayos en muestras de idéntico tamaño secadas en ambiente de laboratorio y en cámara ambiental respectivamente. En los dos apartados siguientes se presenta un resumen de los resultados de los dos ensayos de Lakshmikantha (2009) para tener una referencia de lo que sucede durante el proceso de secado y hacer un estudio comparativo con los resultados obtenidos en esta tesis. Estos ensayos resultan muy interesantes porque se realizaron en contenedores con fondo liso y rugoso, lo cual permite analizar la influencia de las condiciones de contorno. El análisis se completa con la simulación numérica de la sección radial (40 cm × 10 cm) de muestras de 80 cm de diámetro × 10 cm de altura, que complementan el estudio de laboratorio y amplían la comprensión de lo que ocurre durante la desecación, retracción y agrietamiento del suelo.

5.4.3.1. Ensayo sobre una Muestra de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Rugoso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009)

Este ensayo es parte del trabajo de Lakshmikantha (2009) y consiste en una muestra de suelo de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura que fue desecada en ambiente de laboratorio. La temperatura se mantuvo a 35°C y la humedad relativa del ambiente fue del 40% (Figura 5.71). La bandeja contenedora disponía de un fondo rugoso con ranuras circulares (Figura 5.41c). El ensayo tuvo una duración de 38 días, aunque el equilibrio de la pérdida de humedad en el suelo se alcanzó a los 35 días. La muestra estuvo instrumentada con dos sensores Vaisala en dos puntos diametralmente opuestos y cercanos al contorno a 5 cm de profundidad. Se instalaron 4 tensiómetros en el interior de la masa de suelo, uno en el centro y los otros tres equidistantes 18 cm de éste último y del contorno. Dos tensiómetros más fueron dispuestos en los laterales opuestos de la muestra (ver Figura 5.73).

Durante el ensayo se generaron las grietas que se muestran en la Figura 5.70a, dando lugar a siete celdas independientes. Aparentemente, los sensores no indujeron la formación de grietas. Todas las grietas menos una intersectan el contorno de la muestra y la mayoría se extienden en todo el espesor de la muestra. En la parte inferior de la muestra se han producido además grietas curvas (Figura 5.70b). Las marcas dejadas por las ranuras de la bandeja son menos visibles en los extremos de la muestra lo que induce a pensar en arqueamiento de los extremos de la muestra que ha generado varias grietas desde el contorno hacia el centro de la muestra.

En la Figura 5.71 se presenta la evolución de la temperatura y humedad relativa, del aire y del suelo, y la pérdida de humedad del suelo. Tanto la temperatura como la humedad del aire permanecen constantes con pequeñas variaciones. En la Figura 5.71 se distinguen seis etapas: 1) la primera grieta se produce el día 8 cerca del tensiómetro T5; 2) desde el día 11 se formó una grieta justo encima del sensor Vaisala V1, que se desarrolló completamente y produjo lecturas de pérdidas de humedad mayores que en el sensor V2; 3) el día 20 el 80% de la humedad se había perdido, la temperatura del suelo comenzó a aumentar y la curva de pérdida de humedad acusó un cambio de pendiente; 4) el efecto del incremento de la temperatura del suelo se ve en la curva de humedad relativa del suelo que cambia notablemente el día 23; 5) a partir del día 27 no se observan aumentos de temperatura en el suelo y la curva de pérdida de humedad es prácticamente plana; 6) el día 37 se alcanza el equilibrio y las curvas se muestran planas.

Se puede decir que la fase de contracción en condiciones saturadas abarca las tres primeras etapas descritas arriba. Le sigue la etapa en condiciones no saturadas que se extiende hasta la etapa 5) descrita arriba. Durante la última etapa las variables evolucionan hasta sus valores asintóticos hacia el final del ensayo.

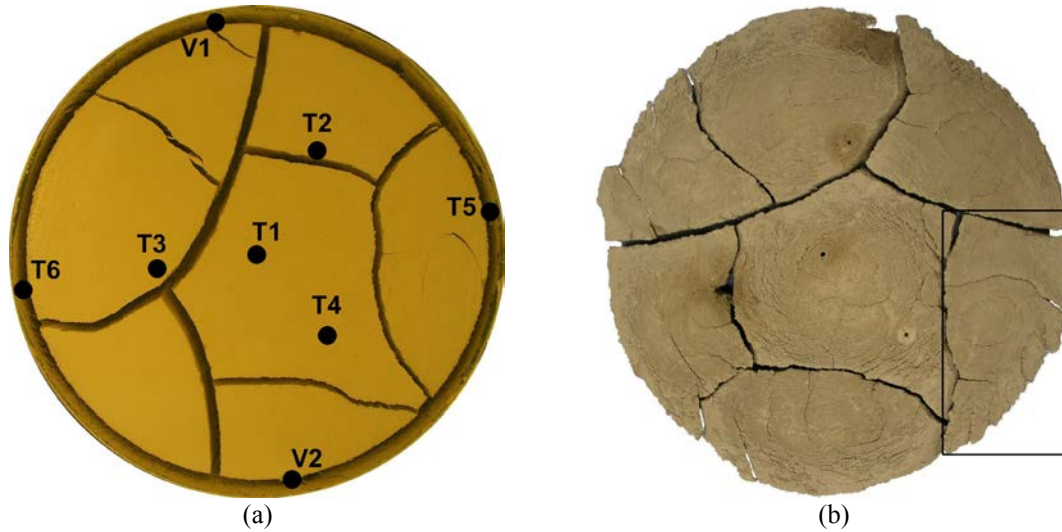


Figura 5.70 – Cara superior e inferior de una muestra de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura después de ser desecada en la cámara ambiental durante 38 días (Lakshmikantha, 2009)

En la Figura 5.72 se observa la evolución de la succión medida indirectamente a través de la humedad relativa del suelo con los sensores Vaisala. Se observa que la muestra permanece prácticamente saturada hasta el día 10 en las inmediaciones de los sensores. La diferencia en los valores se debe probablemente a la grieta que se formó sobre el sensor V1. El día 25 se produce un aumento de la pendiente de la curva de succión con el tiempo, que probablemente tenga que ver con la pérdida de humedad a través de las grietas que ya están plenamente desarrolladas a estas alturas. En esta figura se presenta también la pérdida de humedad en la muestra, la cual muestra cambios de pendiente al mismo tiempo que la curva de succión (líneas azules en la Figura 5.72).

5.4.3.2. Ensayo sobre una Muestra de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Liso, Secada en Cámara Ambiental (Lakshmikantha, 2009)

Este ensayo es idéntico al anterior (ver Figura 5.75) pero con la bandeja de fondo liso (Figura 5.73d). La duración fue de 34 días, alcanzando el equilibrio de la pérdida de humedad en el suelo a los 30 días. La instrumentación es también análoga a la del ensayo anterior (Figura 5.73).

En la Figura 5.74 se muestra el patrón de fisuras al final del ensayo donde se identifican 10 celdas. En las celdas 1, 6, 7 y 9 se observan grietas que se desarrollaron parcialmente. Las grietas en general atravesaron todo el espesor de la muestra. En la cara inferior de la muestra se observaron además grietas curvas y no desarrolladas por completo.

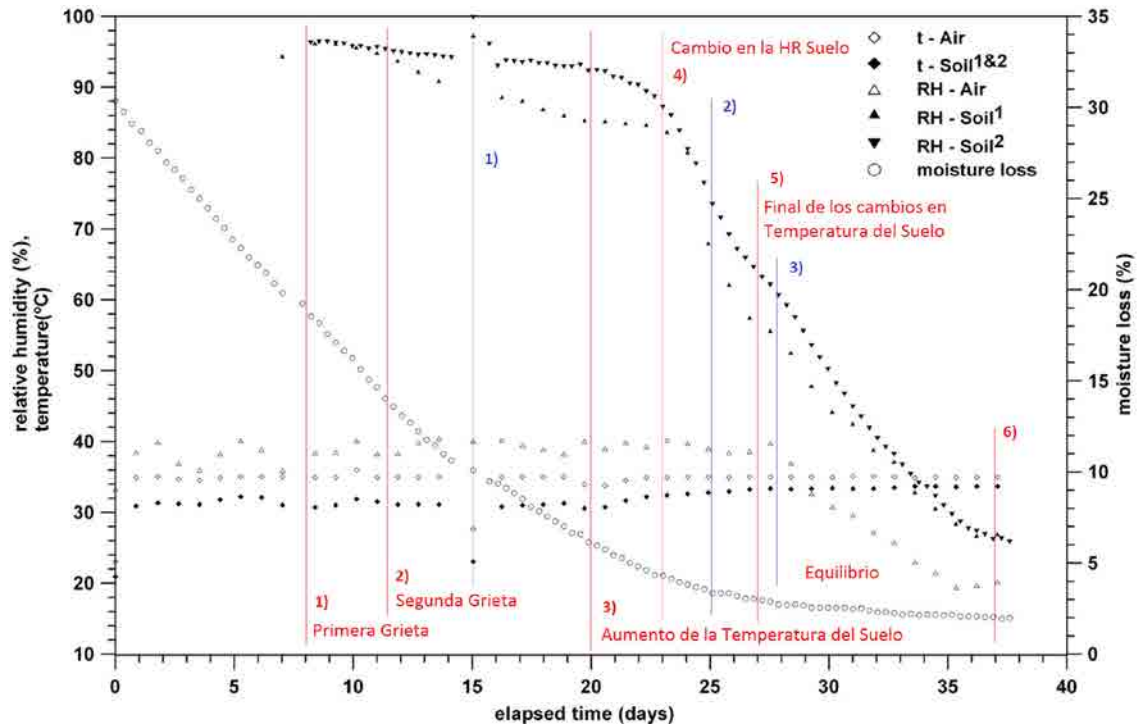


Figura 5.71 – Evolución de la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y humedad relativa del suelo y pérdida de humedad del suelo. Muestra 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo rugoso, secada en cámara ambiental (Lakshmikantha, 2009).

Lakshmikantha (2009) propone tres mecanismos de agrietamiento distintos en este tipo de muestra: 1) grietas superficiales por retracción debidas a condiciones de contorno; 2) grietas producidas por arqueo en el fondo; 3) grietas producidas por sinéresis.

En la Figura 5.74b se presenta la cara inferior de la muestra desmantelada. Se observa que en los orificios donde estaban los sensores la humedad es mayor que en el resto de la muestra. Esto puede condicionar la forma del campo de succión y por lo tanto el comportamiento durante la desecación. La irregularidad del campo de succión y por lo tanto del frente de saturación puede afectar a la deformación y producir las grietas de la manera que se observa en la figura. Evidentemente, es necesario un análisis más detallado del tema.

En la Figura 5.75 se observan la evolución de las variables durante el ensayo y se puede establecer seis etapas como en el caso anterior: 1) la primera grieta se produjo el primer día de ensayo desde el borde en la celda 6 sobre el tensiómetro T6, después no se observó un desarrollo claro del agrietamiento hasta el día 6; 2) el día 10 se observó una grieta totalmente desarrollada sobre el sensor V2, lo cual ocasionó lecturas de mayor pérdida de humedad en dicho sensor; 3) el día 20 el 80% de la humedad se había perdido y las lecturas del sensor V2 cayeron al 60%, al mis-

mo tiempo el sensor V1 acusaba lecturas del 90%. La temperatura del suelo empezó a aumentar produciendo un cambio en la pendiente de la curva de pérdida de humedad del suelo el día 17; 4) el día 22 hay un drástico incremento en la pendiente de la curva de humedad relativa del suelo, lo cual se refleja en el comportamiento de los sensores Vaisala V1 y V2, las lecturas del primero aumentan de valor y las del segundo disminuyen. También se observa un cambio en la pendiente de la curva de pérdida de humedad del suelo; 5) a partir del día 26 no hay cambios de la temperatura del suelo que es igual a la temperatura del ambiente. La curva de pérdida de humedad es prácticamente plana y el dispositivo de extracción de humedad no se enciende puesto que la muestra no puede aportar más humedad al ambiente de la cámara; 6) el equilibrio se alcanza alrededor del día 34.

Nuevamente, se identifican las tres fases fundamentales en este tipo de proceso. La fase de contracción en condiciones saturadas que se extiende durante las dos primeras etapas definidas arriba. La fase no saturada entre las etapas 3) y 4) donde ya se alcanza el equilibrio respecto de la pérdida de humedad de la muestra y finalmente la fase de contracción nula hasta el final del ensayo.

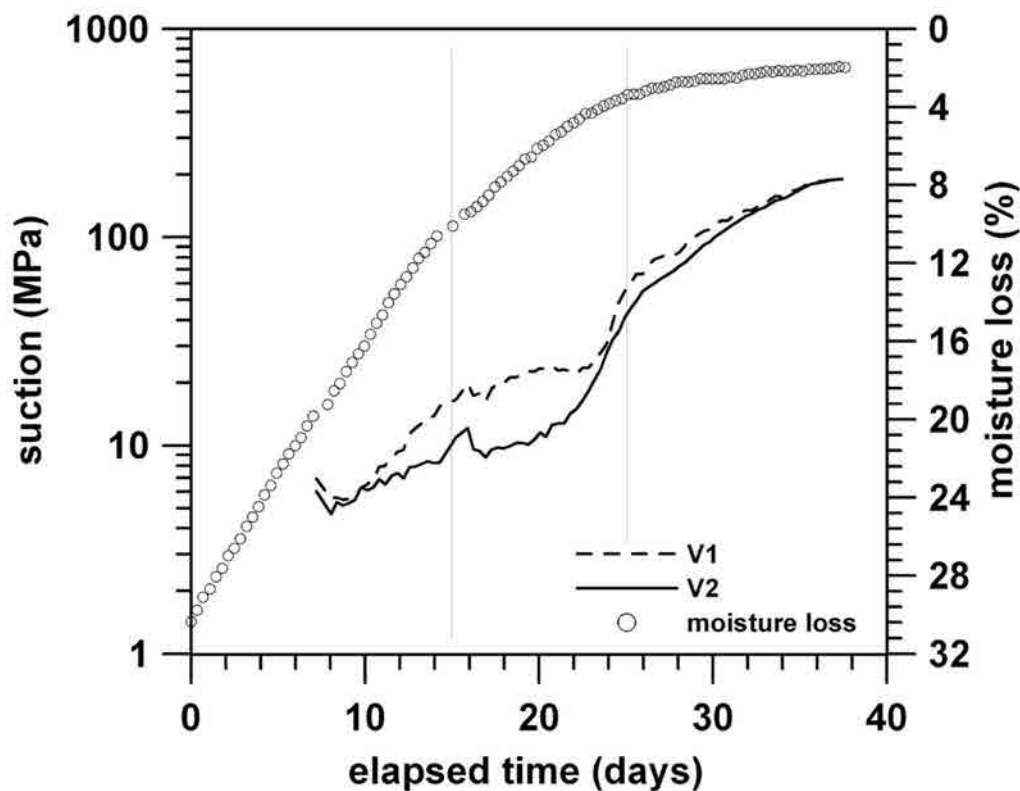


Figura 5.72 – Evolución de la succión y de la humedad. Muestra de suelo de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo rugoso, sometida a desecación en cámara ambiental (Lakshmikantha, 2009)



Figura 5.73 – Distribución de tensiómetros (T) y sensores Vaisala (V). Bandeja de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo liso, secada en cámara ambiental (Lakshmikantha, 2009).

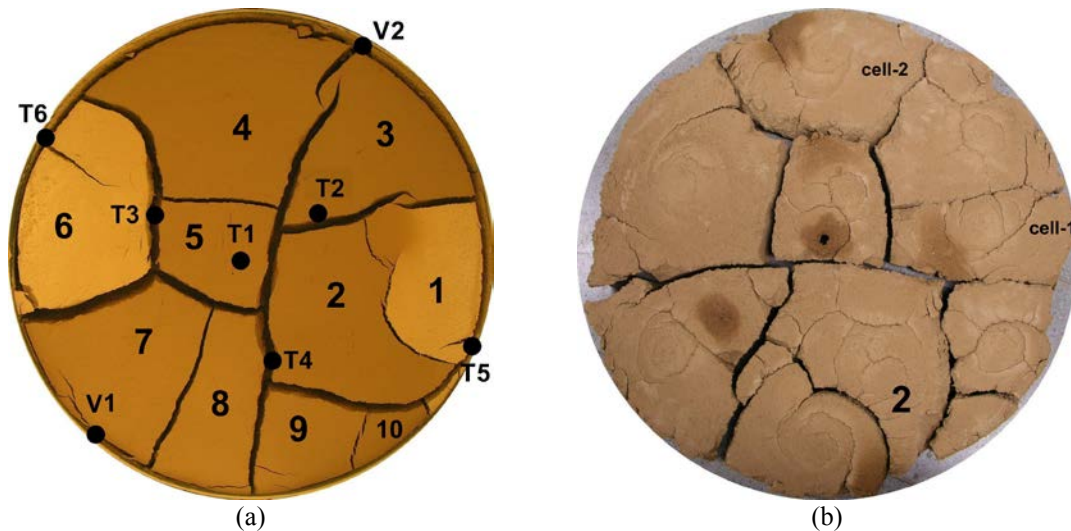


Figura 5.74 – Cara superior e inferior. Muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo liso, después de ser desecada en cámara ambiental durante 34 días (Lakshmikantha, 2009)

En la Figura 5.76 se muestra la evolución de la succión medida indirectamente a través de la humedad relativa del suelo con los sensores Vaisala. Se observa que la muestra permanece prácticamente saturada hasta el día 6 en las inmediaciones de los sensores. La diferencia en los valores se debe probablemente a la grieta que se formó sobre el sensor V2. Los días 12 y 22 se produce un cambio de la pendiente de la curva de succión con el tiempo en el sensor V2, y los días 12 y 24 en el sensor V1, que probablemente tengan que ver con la pérdida de humedad a través de las grietas que ya están plenamente desarrolladas a estas alturas.

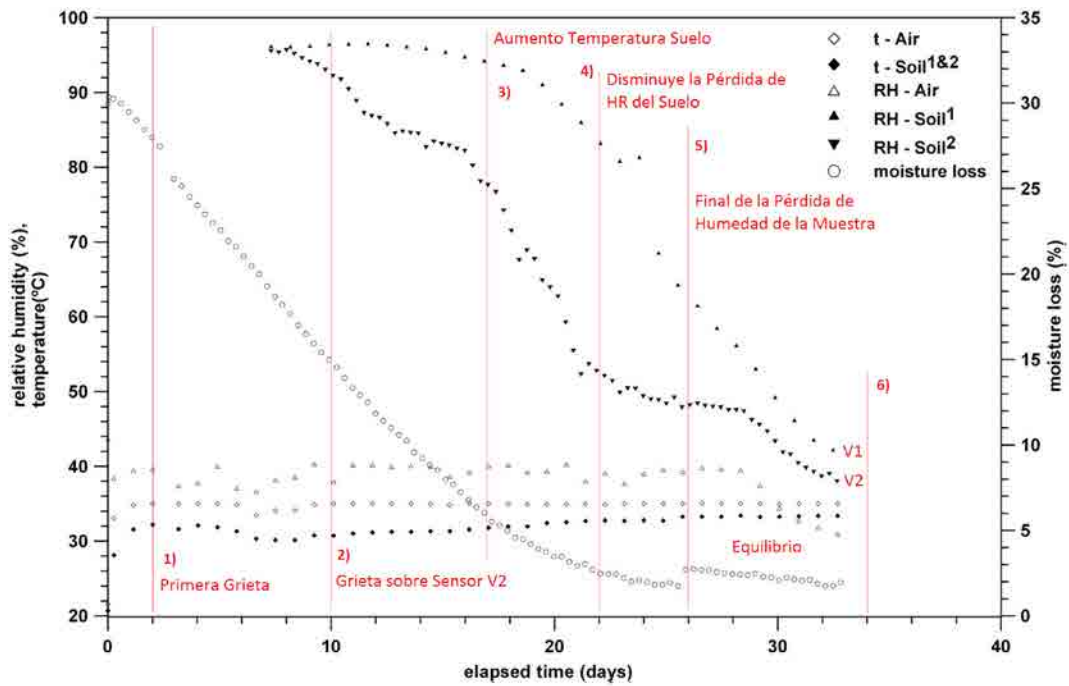


Figura 5.75 – Evolución de la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura y humedad relativa del suelo y pérdida de humedad del suelo. *Muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo liso, secada en cámara ambiental* (Lakshmikantha, 2009)

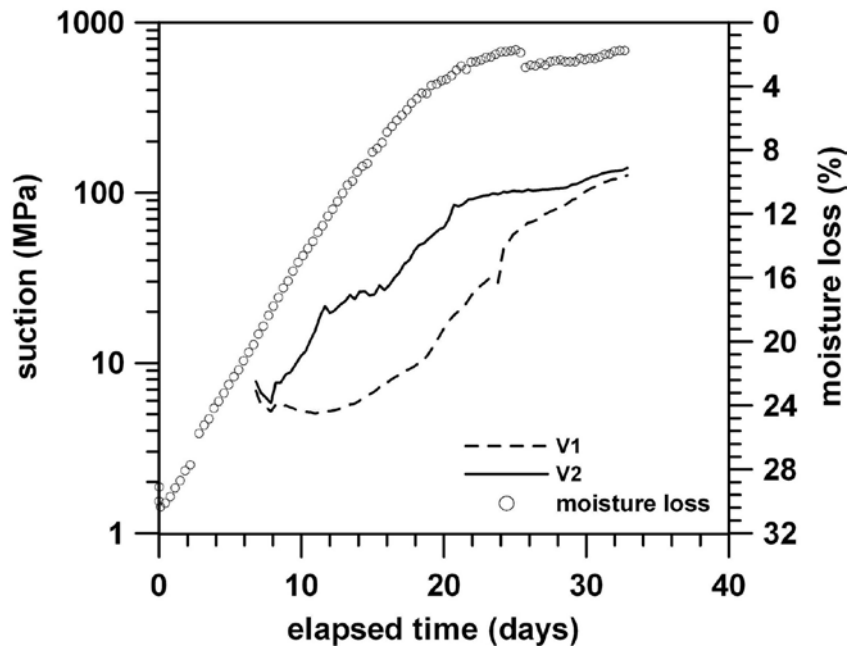


Figura 5.76 – Evolución de la succión y de la humedad. *Muestra de suelo de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura, fondo liso, sometida a desecación en cámara ambiental* (Lakshmikantha, 2009)

5.4.3.3. Ensayo sobre una Muestra de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura, Fondo Liso, Secada en Ambiente de Laboratorio

Este ensayo se presentó en el Capítulo 3, Análisis Experimental, de esta tesis y se trata de una muestra de suelo de 80 cm de diámetro x 10 cm de altura (Figura 5.41d) que fue desecada en ambiente de laboratorio durante 36 días. La temperatura se mantuvo en 24°C con la humedad relativa del ambiente constante del 60% (Figura 5.75). El fondo de la bandeja era liso (Figura 5.73).

En la Figura 5.77 se presenta el patrón de fisuras al final del ensayo, que muestra siete celdas principales identificables en las Figura 5.77a y b. En a) se observa que, aparte de las siete celdas principales, hay tres porciones de suelo que han quedado adheridas parcialmente a las paredes de la bandeja contenedora. En b) se presenta la cara inferior de la muestra una vez desensamblada. Las grietas que definen las siete celdas principales se han propagado a través de todo el espesor de la muestra.

En la cara inferior se observan algunas grietas de pequeñas dimensiones que se han propagado parcialmente. Todavía puede notarse la presencia de grietas curvas como en los ensayos de (Lakshmikantha, 2009), pero de mucho menor tamaño y mucho menos definidas. Las grietas radiales abundan en las porciones parcialmente adheridas a la bandeja.

Las primeras grietas visibles se identificaron el día 10 en el contorno en contacto con la bandeja en el cuadrante inferior derecho e izquierdo (Figura 5.78a). Al día siguiente, se identificó otra grieta similar en el cuadrante inferior izquierdo que se unió luego a la primera siguiendo más o menos una trayectoria paralela al borde de la bandeja. Posteriormente, la grieta perimetral se completó a lo largo de todo el contorno el día 20. En la Figura 5.78 se presenta la secuencia de agrietamiento de la muestra ensayada. El día 20 se observó una grieta que comenzó casi en el centro exacto de la muestra y que se propagó en direcciones opuestas hasta alcanzar los bordes con un ángulo de acometida de 90°.

En el Capítulo 3 de esta tesis se comprobó que no todas las grietas comenzaron en la superficie visible. Algunas se iniciaron en el interior de la masa de suelo o en la superficie inferior. De todas formas, la secuencia de agrietamiento de este ensayo muestra que las grietas no siempre se propagan en dirección vertical, sino que lo hacen siguiendo un camino marcado por el contorno de la muestra en el contacto con la bandeja primero y en una combinación de propagación vertical y horizontal al mismo tiempo. Es decir, el patrón de propagación es en realidad tridimensional. Todo esto es consistente con lo visto en los ensayos de (Lakshmikantha, 2009).

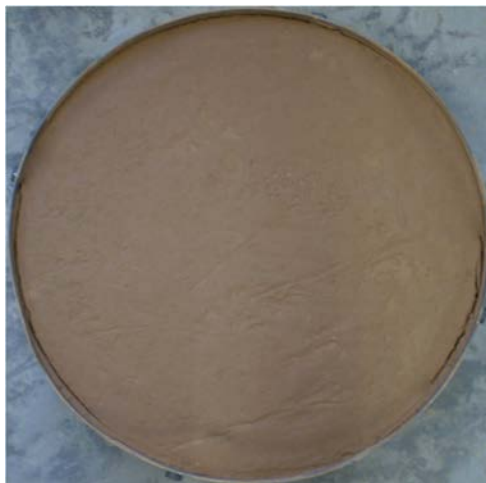


(a)

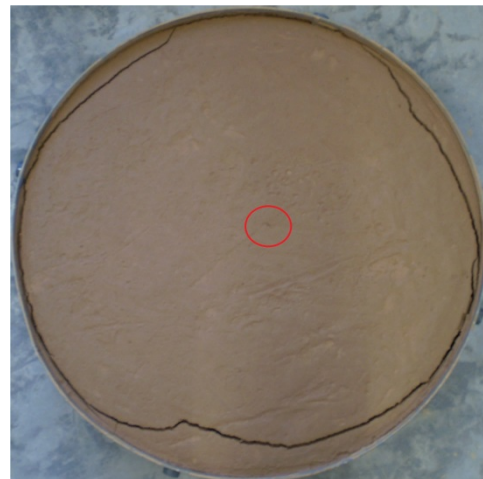


(b)

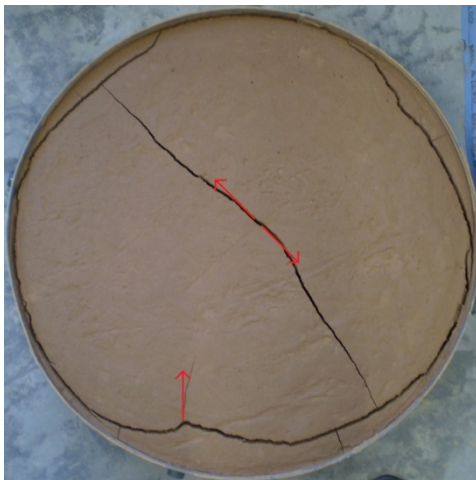
Figura 5.77 – a) Cara superior de la muestra; b) cara inferior de la muestra: 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, fondo liso, después de ser desecada en ambiente de laboratorio durante 36 días



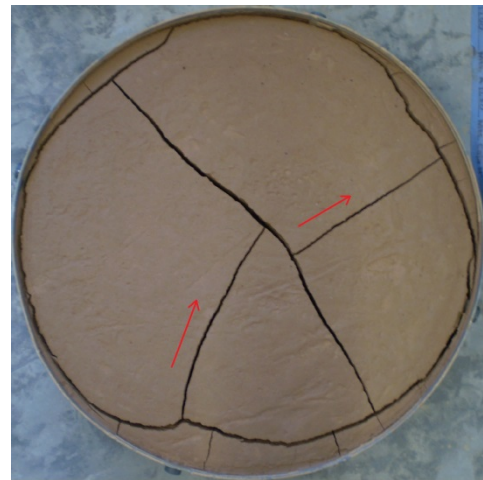
(a) Día 10. Primeras Grietas



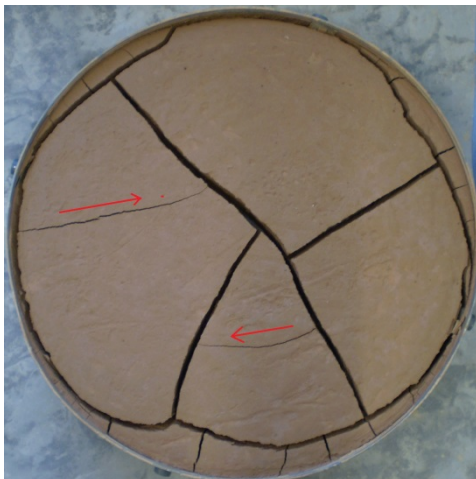
(b) Día 20



(c) Día 21



(d) Día 23



(e) Día 29



(f) Día 36

Figura 5.78 – Secuencia del agrietamiento. *Muestra de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, fondo liso, luego de ser desecada en ambiente de laboratorio durante 36 días*

5.4.3.4. Comparación de los Ensayos sobre Muestras Cilíndricas de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

El patrón de fisuración en la superficie visible de la muestra es similar en los tres casos presentados, a pesar de las diferencias en temperatura y humedad relativa del ambiente 24°C - 35°C y 60% - 40% para los ensayos de esta tesis y los ensayos de (Lakshmikantha, 2009) respectivamente.

En la cara inferior se observan diferencias importantes. La rugosidad del fondo de la bandeja y la instrumentación en su conjunto parecen tener cierta influencia en el patrón final de fisuración. Se observa que el ensayo de esta tesis, con fondo liso y sin instrumentación, presenta una disminución de grietas en el fondo comparadas con los ensayos de (Lakshmikantha, 2009). Se observa, sin embargo, que a pesar del fondo liso el suelo se adhiere bastante a la bandeja. La forma irregular de las celdas formadas produce perfiles de succión complejos en la matriz de suelo. Este perfil complejo puede inducir deformaciones no isótropas en la celda debido a que la adherencia con la bandeja también es compleja e irregular. Además, existe una interacción mecánica entre las celdas adyacentes que también pueden explicar el origen de las grietas curvas por debajo de la muestra.

Respecto del arqueo, se puede decir que es muy sutil en estos ensayos, lo cual es debido en parte a que el suelo no es muy plástico y además a que la presencia de las grietas reduce dicho efecto como se estudió en el apartado de Influencia de una Grieta Central.

5.4.3.5. Simulación de Ensayo de Secado en una Muestra de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

La primera grieta que se forma en ensayos sobre muestras cilíndricas, es una grieta bien definida que se propaga en todo el espesor de la muestra. Esta grieta se inicia en el contorno formado por la pared lateral de la bandeja y se propaga siguiendo dicho contorno. Son grietas tridimensionales que se pueden estudiar en dos dimensiones considerando una dirección de propagación vertical.

En este apartado se presenta la simulación con el código desarrollado en esta tesis, para analizar el proceso de desecación en una muestra de 80 cm de diámetro por 10 cm de altura, incluyendo el análisis de una grieta en el contorno en contacto con la bandeja, que se produce en la superficie y propaga hacia abajo, hasta alcanzar el fondo de la bandeja. Se utilizan tanto los datos de los ensayos de (Lakshmikantha, 2009), como los del Capítulo 3 de esta tesis, por ser del mismo tamaño y haber estado sometidos a condiciones similares.

5.4.3.6. Enfoque del Modelo Numérico de esta Tesis

Se analizan las distintas etapas de los ensayos utilizando diferentes esquemas como los que se observan en la Figura 5.8. El período inicial de desecación, sin grietas, se analiza utilizando el esquema CC02-PC01. Seguidamente se presenta otra simulación con el esquema CC03-PC01 para reproducir el instante de aparición de la primera grieta visible. Además, se estudian esquemas que incluyen una grieta en el lateral parcialmente propagada primero (esquema CC03-PC01 mas grieta de 5 cm en el borde) y totalmente propagada después (esquema CC09-PC02). Esta estrategia permite añadir información acerca de la evolución de las principales variables del problema a los resultados de laboratorio de los tres ensayos.

El modelo que se presenta en esta tesis se basa en la Mecánica de Suelos no Saturados. Por este motivo se han elegido como variables de estado a la succión, s , por un lado y la tensión neta, σ_{ij}^{neta} , por otro. Estas variables se consideran independientes y no están ligadas por el concepto de tensión efectiva como en el caso de suelos saturados o si adoptáramos una variable tipo Bishop (ver ecuación 4.1) como se presentó en el Capítulo 4, Modelo Numérico. La elección de variables separadas se justifica por su consistencia (Fredlund & Morgenstern, 1977) y porque en el laboratorio se pueden medir con relativa facilidad.

Se ha visto que la etapa en condiciones saturadas tiene una duración de entre 1 y 10 días en los ensayos presentados en esta tesis y en los ensayos de (Lakshmikantha, 2009). Debido a la naturaleza no saturada del modelo, es difícil capturar el comportamiento en los primeros días de los ensayos debido a que el modelo evoluciona rápidamente hacia condiciones no saturadas.

Para poder calibrar el modelo es importante poder controlar la condición de contorno en succión y ajustarla al comportamiento del suelo en el laboratorio, sobre todo en la primera fase saturada. Para ello, se propone el uso de una condición de contorno de succión en función del tiempo.

Una variación típica de la variable fundamental de succión en el problema de desecación es la que se puede observar en la Figura 5.79. En dicha figura, se observa que durante los primeros seis días los cambios de succión son muy pequeños. De hecho para este ensayo la lectura de los tensiómetros, es cercana a cero y en los primeros 15 días no llega a los 80 kPa (ver Lakshmikantha, 2009), que para los valores máximos alcanzados en el ensayo (110 MPa) es prácticamente cero.

Esta primera fase con poco cambio en la succión corresponde a las condiciones saturadas. Para esta fase, se propone utilizar la información que se tiene de laboratorio y alimentar al código de elementos finitos con dicha información. Para ello, se impone en los primeros días del proceso la succión que se mide en el laboratorio.

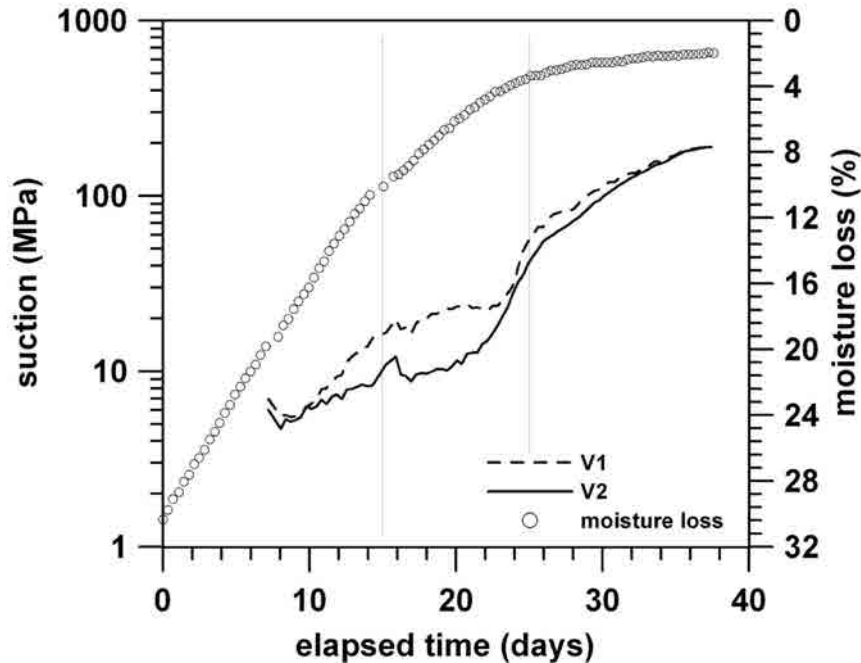


Figura 5.79 – Pérdida de humedad y succión vs tiempo. *Muestra cilíndrica de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura.* (Lakshmikantha, 2009).

Sumado a la dificultad de convergencia del modelo, la aplicación de altos valores de succión en los contornos produce un secado en general más rápido que en la realidad. Por este motivo, es importante controlar la forma de aplicar las condiciones de contorno en succión buscando calibrar con los ensayos la evolución de dicha variable con el tiempo.

El código en MATLAB permite la aplicación de la condición de contorno en succión de manera gradual. Como puede verse en la Figura 5.79 las medidas de succión tomadas en el laboratorio son erráticas incluso después de haber sido filtradas electrónicamente y numéricamente. Así pues, el modelo debe interpolar dicho valores y seguir la tendencia más que capturar las curvas experimentales.

Para el análisis numérico de los ensayos presentados en este apartado, se utilizan cuatro esquemas diferentes, que representan cuatro fases en el proceso de secado y que incluyen una grieta en el contorno en contacto con la bandeja.

5.4.3.6.1. Análisis de Dsecación con Esquema CC02-PC01

En la Figura 5.80 se presenta la simulación de una muestra de 10 cm de altura contenida en una bandeja sin fricción en los contornos pero que no permite separación entre bandeja y suelo (Figura 5.8b). Se han simulado 40 días de desecación (los ensayos en estas muestras han tenido una duración de entre 35-38 días) aplicando succión sobre el contorno superior aumentando su valor a lo largo de seis días hasta alcanzar 60 MPa.

En primer lugar, como ya se había estudiado previamente, este esquema no produce tracciones horizontales que induzcan a la formación de grietas. Sin embargo, permite ver la estrecha relación que tiene la succión con el resto de los parámetros y variables del modelo.

La evolución de las variables se estudia en los puntos de referencia que se indican en las Figura 5.80a (punto blanco) y Figura 5.80b (puntos azul, rojo y verde). En la Figura 5.80b se observa que la tensión horizontal es de compresión y aumenta con la profundidad. En la Figura 5.80c se observa que los desplazamientos horizontales son nulos y los verticales son mayores en la superficie superior y disminuyen en las cercanías del fondo de la muestra. La inexistencia de tracciones se explica como antes debido a que los gradientes de succión son solo verticales y no hay coacciones que induzcan tracciones en la matriz de suelo.

La deformación total alcanzada en la simulación es muy similar a la obtenida en el laboratorio en muestras de este tamaño, lo cual indica que si bien este esquema no permite estudiar agrietamiento si permite estudiar la retracción que sufre el suelo en desecación. De hecho este es un caso unidimensional que será útil en algunas circunstancias.

La simulación reproduce lo que sucede en los primeros 10 días del ensayo cuando el suelo permanece saturado y sin grietas. No se intenta calibrar aquí exactamente la curva de la Figura 5.79, puesto que la muestra que se simula es la realizada sin instrumentación y dicha figura sólo se toma de referencia. Sin embargo, sí se ha utilizado la técnica de imponer las condiciones de contorno gradualmente para lograr capturar el comportamiento de la succión medida en los ensayos de laboratorio.

En la Figura 5.81 se muestra *a)* la variación de la succión con el tiempo en el punto de referencia blanco de la Figura 5.80a. Se observa el efecto de la aplicación gradual de la succión como condición de contorno. Se logra reproducir así el comportamiento medido en el laboratorio y que se puede ver en la Figura 5.79. La succión es la variable fundamental del modelo y afecta a las demás variables en distintos grados; *b)* la porosidad en el mismo punto de referencia anterior. Se observa la influencia de la aplicación gradual de la succión en el borde superior de la sección analizada sobre la porosidad.

En la Figura 5.82 se ve que todas las variables que dependen de la succión se ven afectadas por el cambio en la aplicación de las condiciones de contorno. Esta técnica permite calibrar la simulación para aproximar mejor lo que sucede en el laboratorio, sobre todo en la fase en condiciones saturadas que es la más problemática para el modelo propuesto como ya se ha discutido previamente.

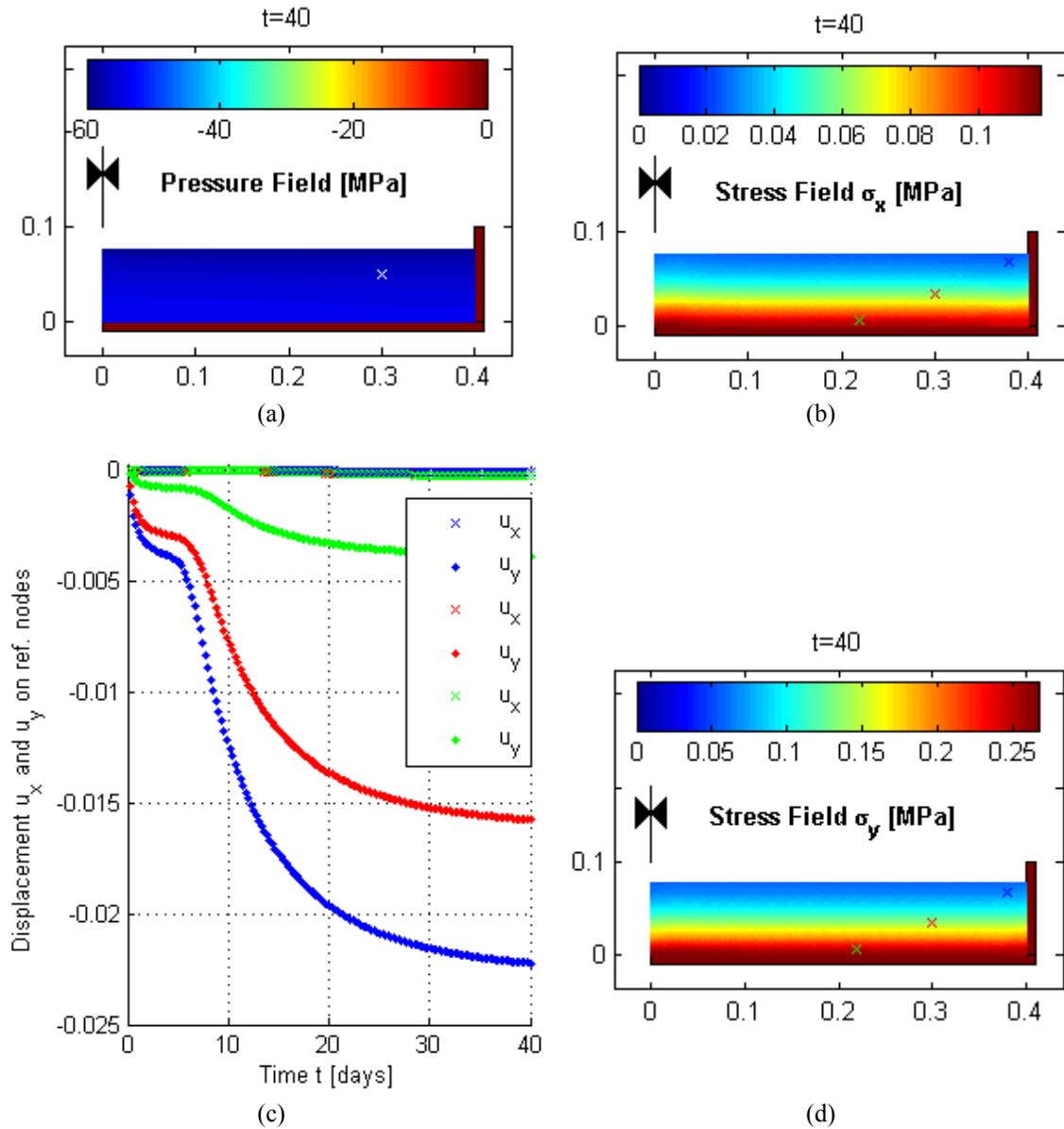


Figura 5.80 – Esquema CC02-PC01. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales

5.4.3.6.2. Análisis de Desecación con Esquema CC03-PC01

Las Figura 5.83, Figura 5.84 y Figura 5.85 presentan el mismo ejercicio presentado previamente pero considerando las condiciones de contorno CC03-PC01 (Figura 5.8c). Como se había visto previamente, este tipo de esquema favorece la aparición de tensiones horizontales de tracción que producirán grietas entre el suelo y la bandeja. Al igual que en el caso anterior se observa la influencia directa que tiene la aplicación de la condición de contorno en succión sobre los parámetros y las variables del modelo.

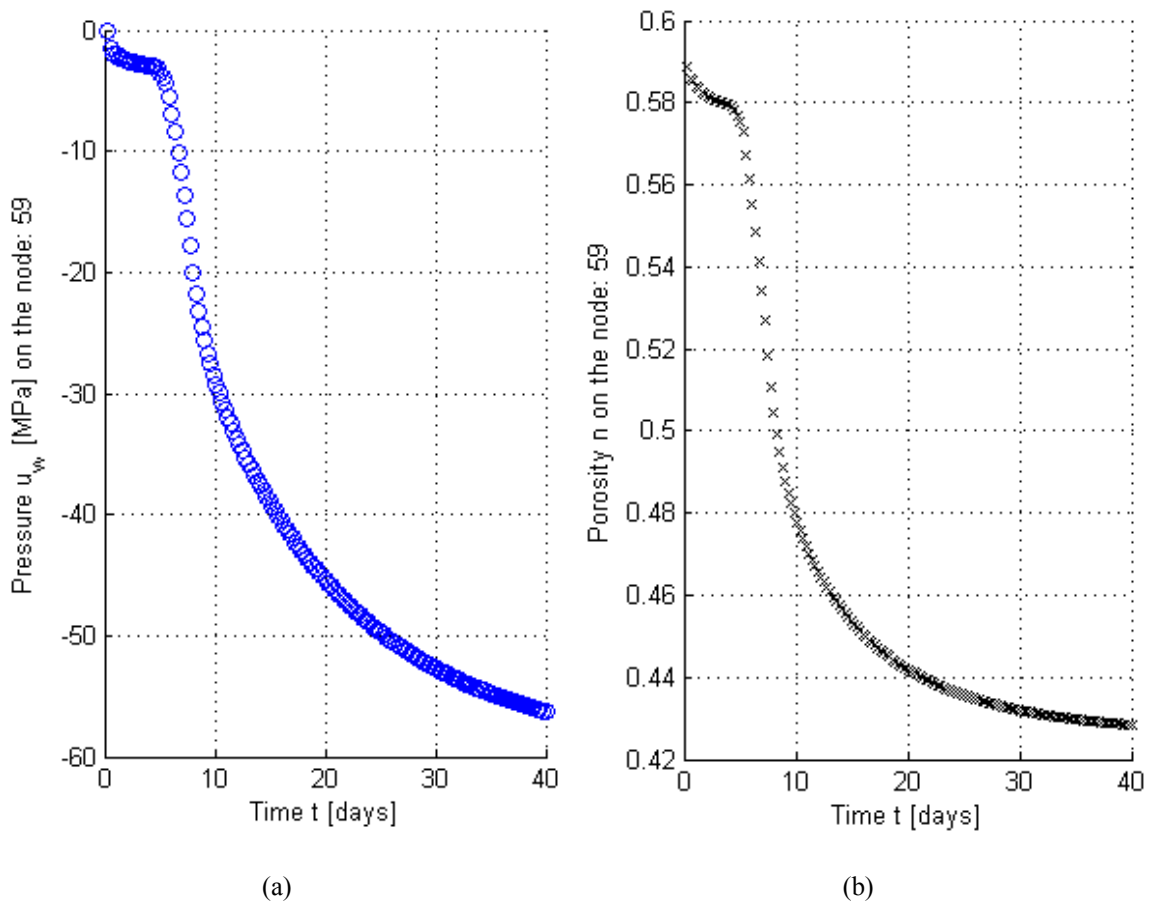


Figura 5.81 – Esquema CC02-PC01: *a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.80a.*

Este esquema de trabajo es ideal para predecir el momento de iniciación de la grieta. En la Figura 5.85c se observa el comportamiento de las tensiones horizontales en el contacto con la bandeja (curva azul inferior). La imposición retardada de la succión en el contorno permite calibrar el modelo de forma que se puede predecir el inicio del agrietamiento en el momento que se produce en el laboratorio.

En los ensayos la fase saturada varía entre 10-17 días, y se alcanzan succiones de aproximadamente 110 MPa. En este ensayo la succión impuesta alcanzó los 60 MPa a los seis días. Introduciendo estas diferencias se ha podido reproducir el inicio de la grieta a los 10 días como ocurrió en el ensayo.

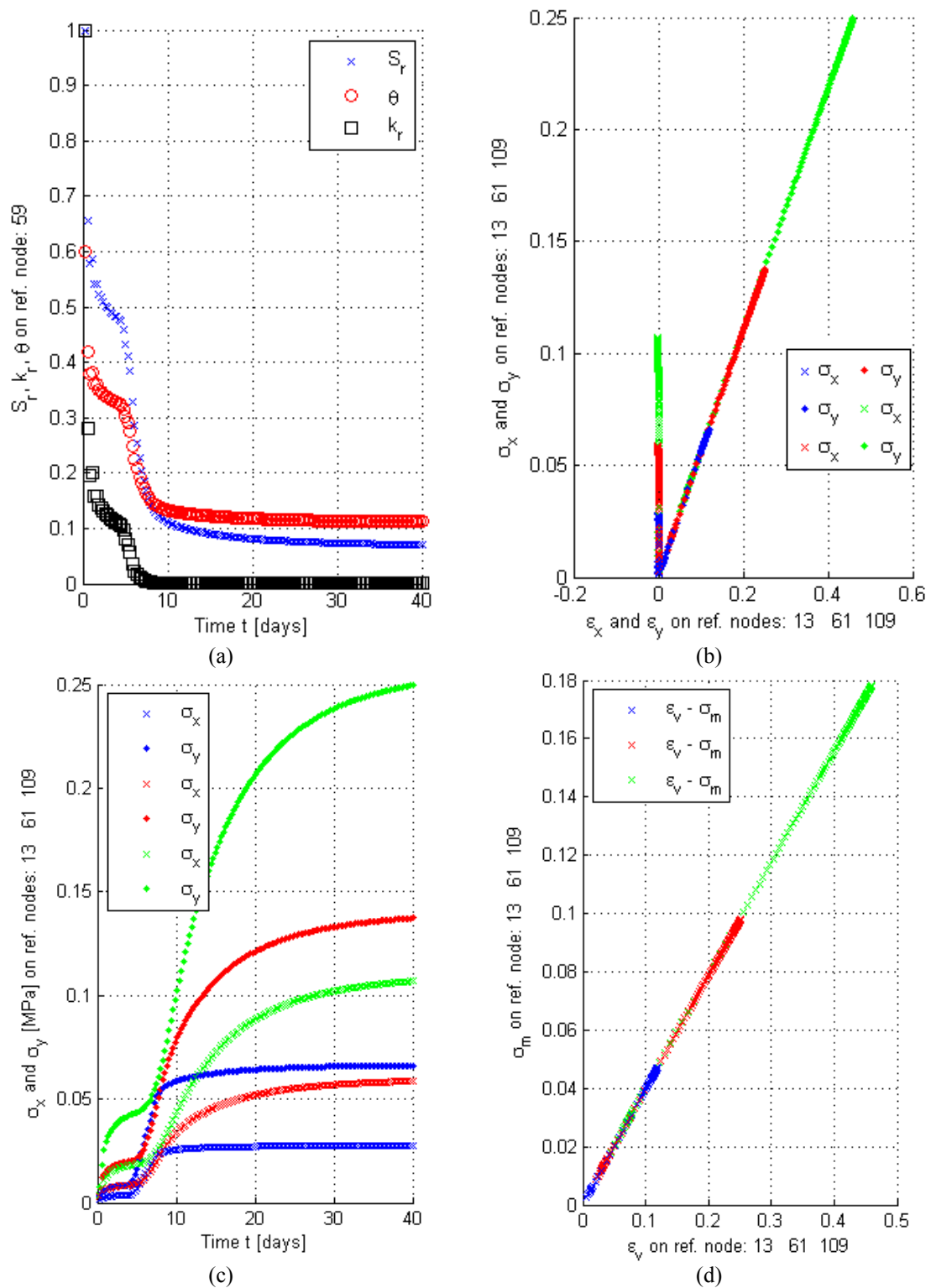


Figura 5.82 – Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC02-PC01: a) grado de saturación, permeabilidad relativa y contenido volumétrico de agua en función del tiempo; b) relación tensión-deformación; c) tensión en función del tiempo; d) tensión media vs deformación volumétrica.

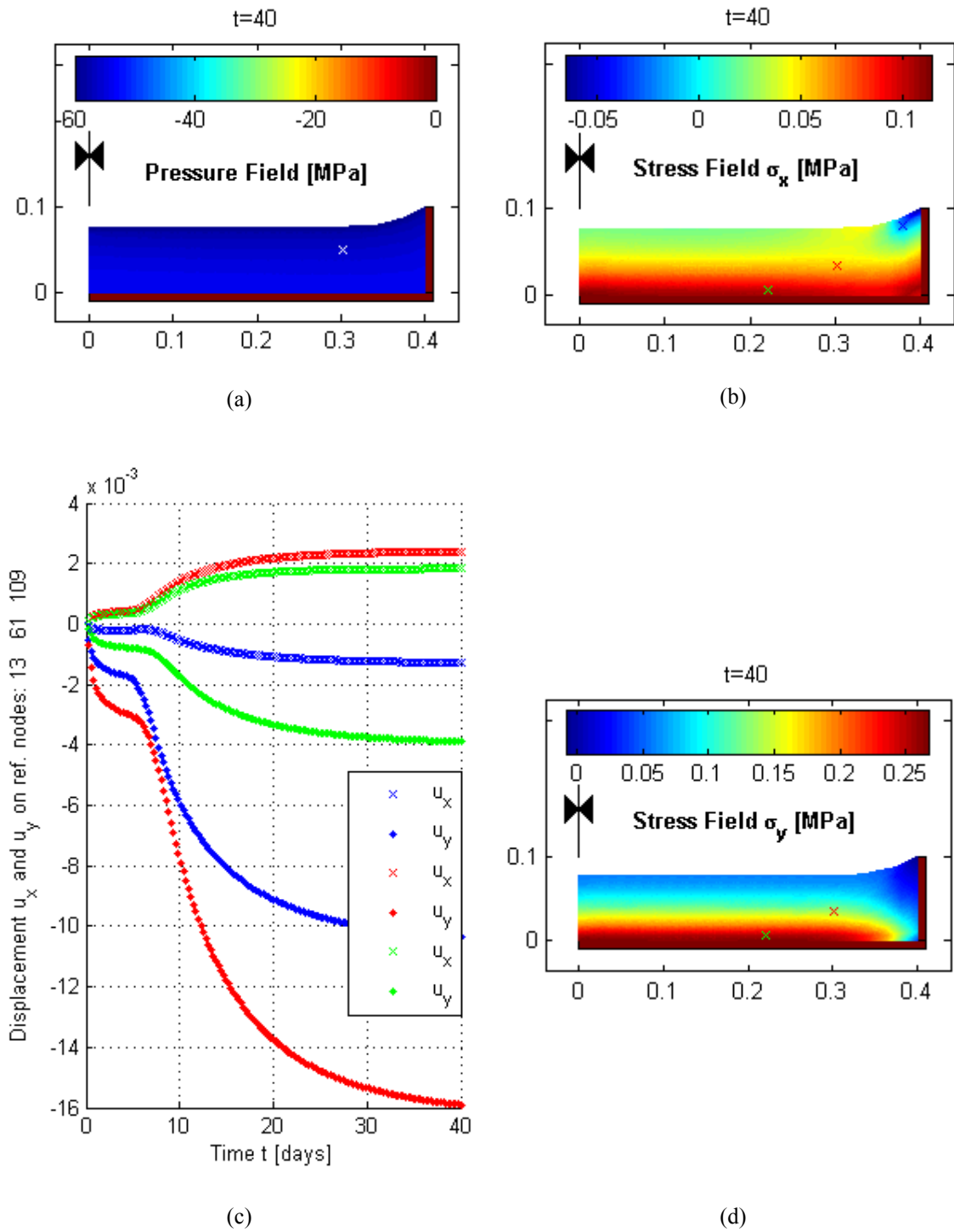


Figura 5.83 – Esquema CC03-PC01. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales

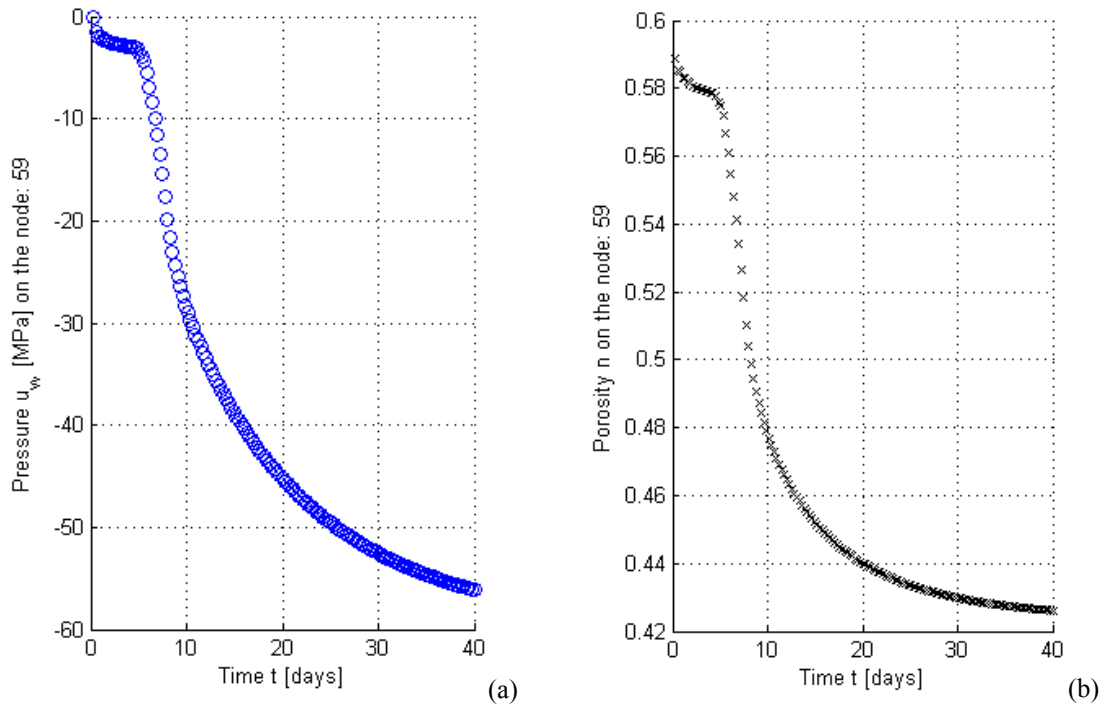


Figura 5.84 – Esquema CC03-PC01: a) variación de succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.83a.

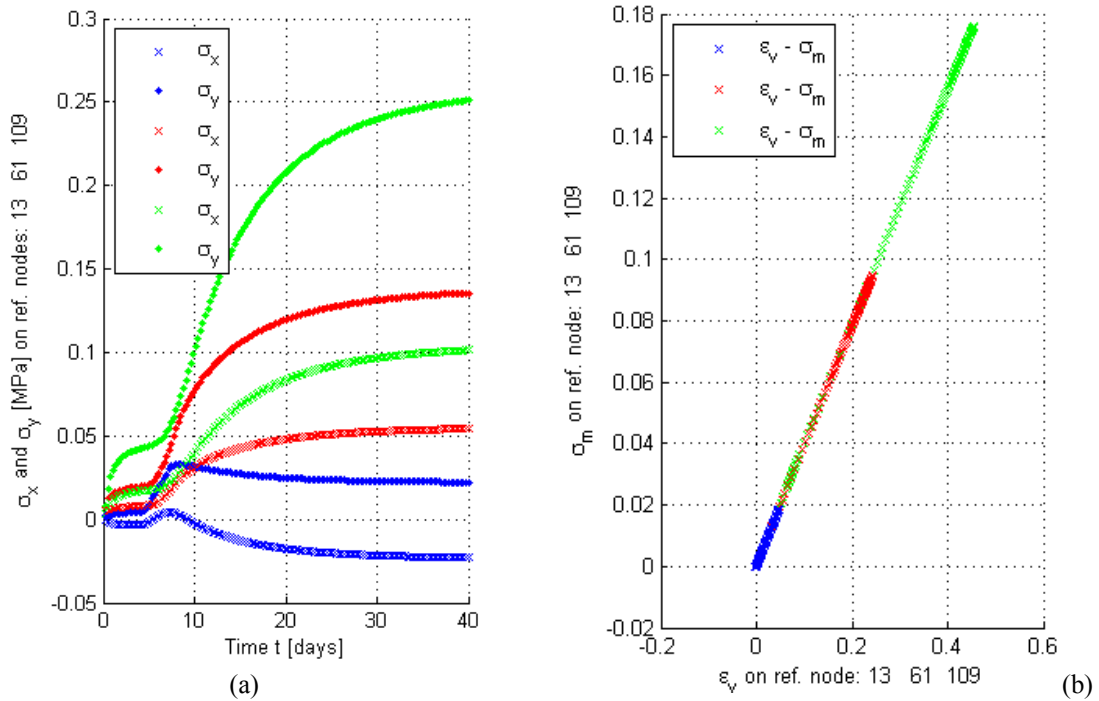


Figura 5.85 – Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC03-PC01: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; d) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.3.6.3. Análisis de Dsecación con Esquema CC03-PC01 y Grieta Lateral Parcialmente Propagada

En este caso se ha utilizado el esquema CC03-PC01 (Figura 5.8) añadiendo una grieta de 5 cm propagada desde la superficie hacia el fondo de la muestra. Se ha aplicado succión en el contorno de la grieta y se han simulado 40 días de desecación.

En la Figura 5.86 se presentan los resultados de la simulación a los 40 días de secado: *a)* campo de succión; *b)* campo de tensiones horizontales; *c)* evolución de los desplazamientos en el tiempo; *d)* campo de tensiones verticales.

Como puede apreciarse en los resultados, existe una interrelación entre variables mecánicas e hidráulicas. Son precisamente estas relaciones las que gobiernan el problema y su posible interpretación en términos hidromecánicos.

Esta simulación representa un instante en que la muestra ha desarrollado parcialmente una grieta lateral que no evoluciona y que sin embargo afecta al proceso de desecación en comparación con los estados anteriores sin grieta.

Este esquema es idóneo para la aplicación de la MFLE, puesto que se ha definido una grieta inicial de 5 cm de longitud, lo cual permitiría calcular los parámetros de la mecánica de fractura y poder utilizar sus criterios para predecir la propagación de la grieta.

En principio no debería haber problemas puesto que las simulaciones capturan sin problemas la concentración de tensiones en la punta de la grieta como se ve en la (Figura 5.86b).

La evolución de las tracciones en la punta de la grieta se presentan en la (Figura 5.88a). Se observa que en general las tensiones son de compresión pero se producen tracciones en la punta de la grieta que si superan la resistencia a tracción del suelo, para el contenido de humedad en ese instante, producirán la propagación de dicha grieta.

La grieta puede producirse tanto en la fase saturada como no saturada. Los valores de tensión alcanzados son suficientes para propagar la grieta si tenemos en cuenta que la resistencia a tracción de la arcilla de Barcelona ha sido medida y varía entre 0 y 0.0035MPa (Lakshmikantha, 2009).

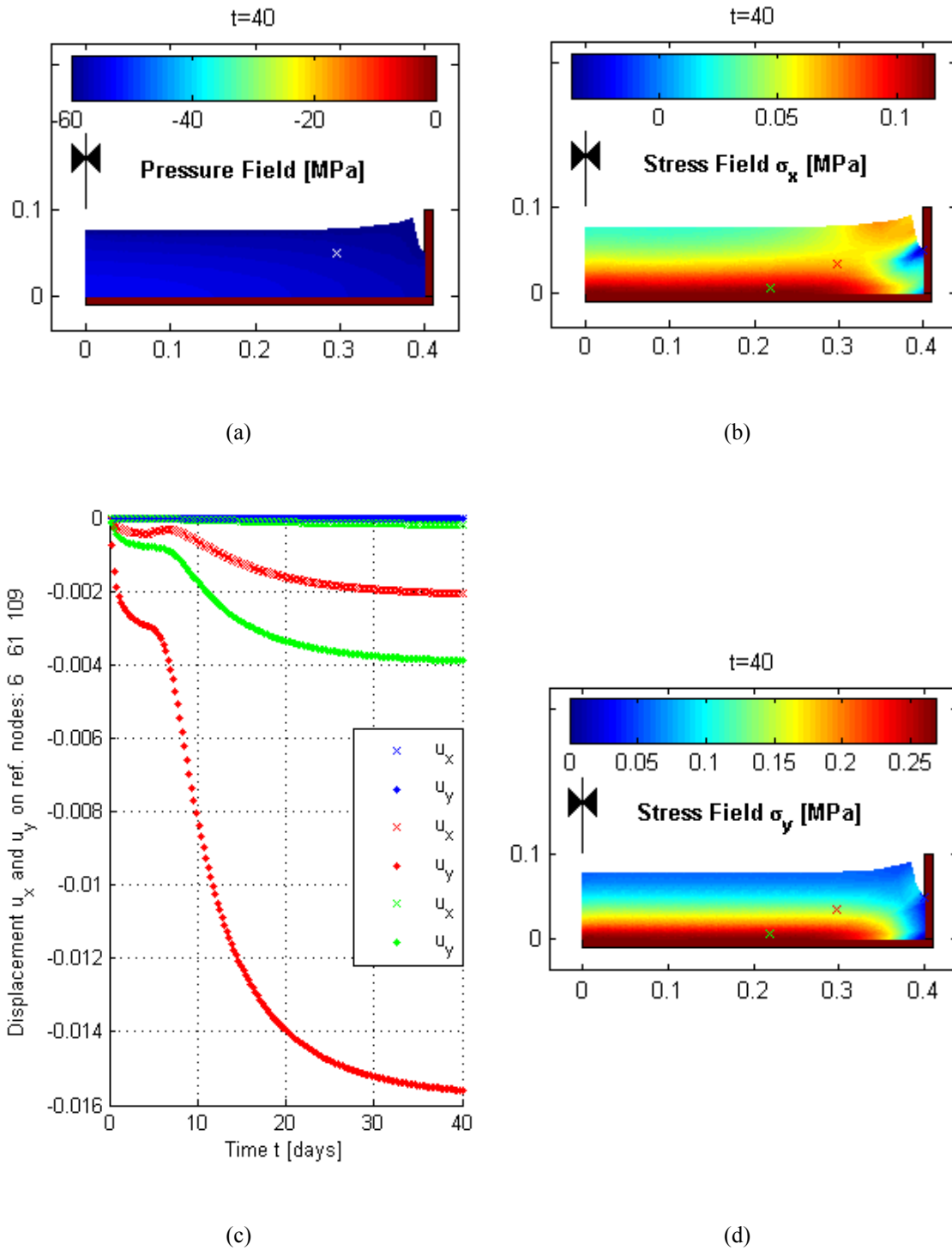


Figura 5.86 – Esquema CC03-PC01 y grieta lateral parcialmente propagada. Simulación a los 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales.

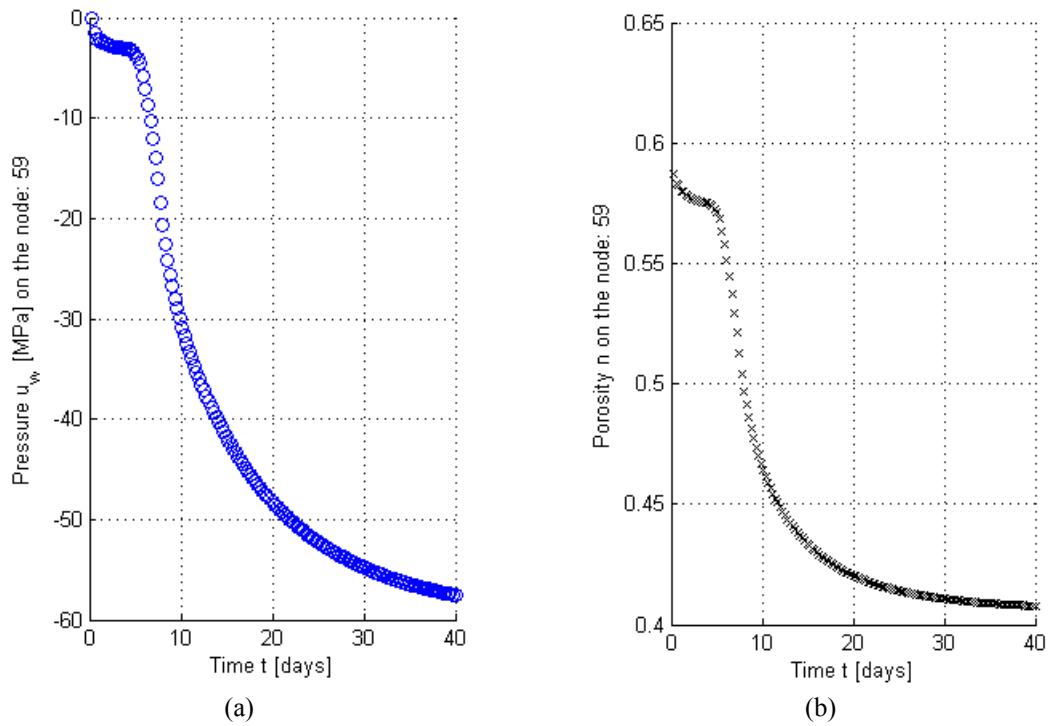


Figura 5.87 – Esquema CC03-PC01 con grieta lateral parcialmente propagada: a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco Figura 5.86a.

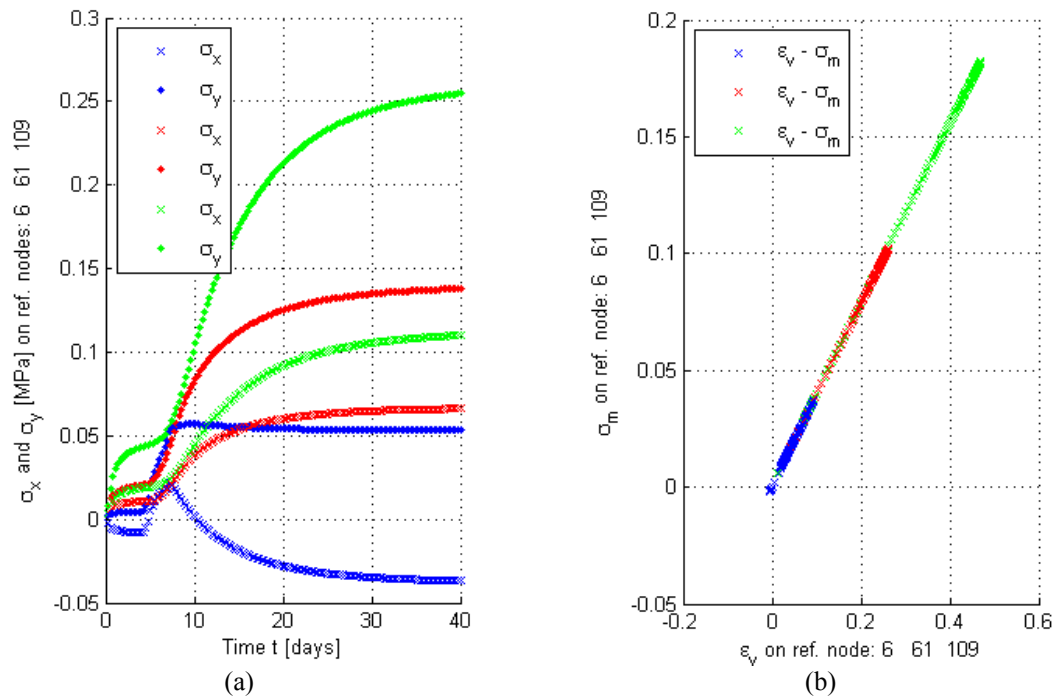


Figura 5.88 – Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC03-PC01 con grieta lateral parcialmente propagada: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.3.6.4. Análisis de Desecación con Esquema CC09-PC02

Con este último esquema se estudia lo que sucede una vez que una grieta lateral se ha propagado desde la superficie hasta el fondo de la muestra de 10 cm de altura.

Se considera que la succión actúa tanto en el contorno superior como en el lateral. En la Figura 5.89a se presenta el campo de succión al final de los 40 días. Se observa que la succión es prácticamente uniforme en toda la muestra lo cual indica que el ensayo alcanza el equilibrio en el tiempo que se ha visto en el laboratorio. La forma final de la sección y la magnitud de la retracción simulada se corresponde con lo observado en el laboratorio. La apertura de la grieta es un poco mayor debido a que se considera que no hay adherencia entre la pared lateral de la bandeja y el suelo, cuando en el laboratorio esta adherencia es clara y evidente. Las tensiones horizontales son todas de compresión y máximas en el centro inferior de la sección (Figura 5.89b) lo cual se debe a que la succión y las condiciones de contorno en desplazamientos son simétricas respecto del eje vertical que coincide con el borde izquierdo de la sección. Lo mismo ocurre con las tensiones verticales presentadas en la Figura 5.89d.

Los desplazamientos que se muestran en la Figura 5.89c confirman las condiciones de contorno adoptadas. Se observan desplazamientos mayores en la superficie mientras que el fondo de la sección se ven restringidos en sus desplazamientos por las coacciones que representan la adherencia con el fondo de la bandeja.

La evolución de la succión en el tiempo es ligeramente diferente en los cuatro casos analizados. El punto donde se analiza es el punto de referencia blanco sobre el campo de succión de las figuras para los cuatro esquemas. La succión alcanza valores ligeramente mayores a medida que la grieta es más profunda. También se observa una evolución más brusca cuanto más profunda es la grieta. La parte final es más tendida para grietas más profundas.

La variación de la porosidad con el tiempo también es diferente para los distintos esquemas analizados. Con la primera simulación se calculó una porosidad final de 0.43 mientras que en el último caso el valor calculado fue de 0.39. Menos porosidad indica más retracción en el punto de análisis pero la retracción global fue disminuyendo. A mayor cantidad de contornos con succión, mayor rigidez de la sección en menor tiempo.

En la Figura 5.91 se presentan la evolución de las tensiones con el tiempo y la relación tensión-deformación en los puntos de referencia mostrados en las Figura 5.89b y d, que es no lineal. Las tensiones muestran el efecto de la aplicación gradual de la succión en el contorno.

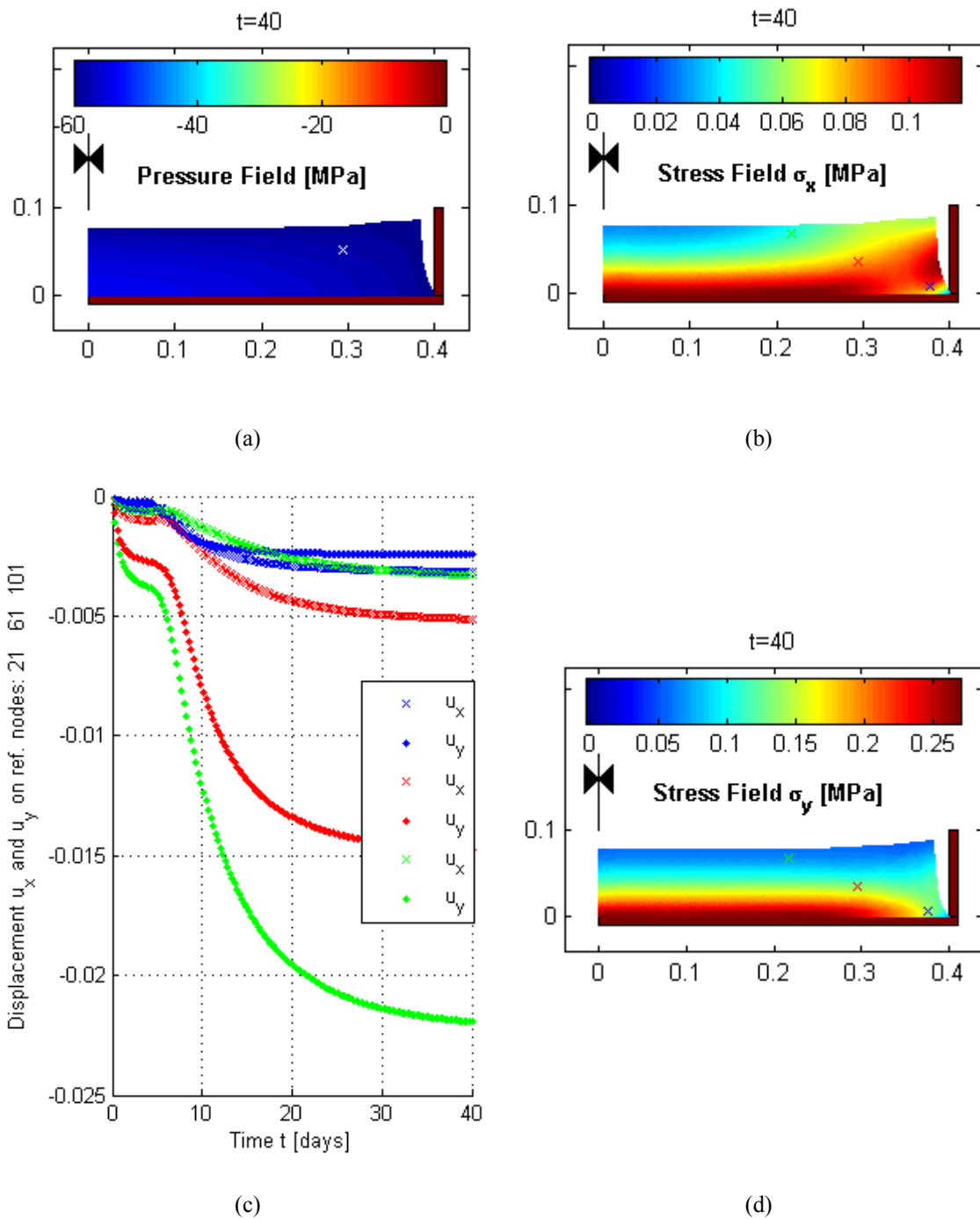


Figura 5.89 – Esquema CC09-PC02. Simulación después de 40 días de desecación en muestra de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura: a) succión; b) tensiones horizontales; c) desplazamientos (en metros) vs tiempo; d) tensiones verticales

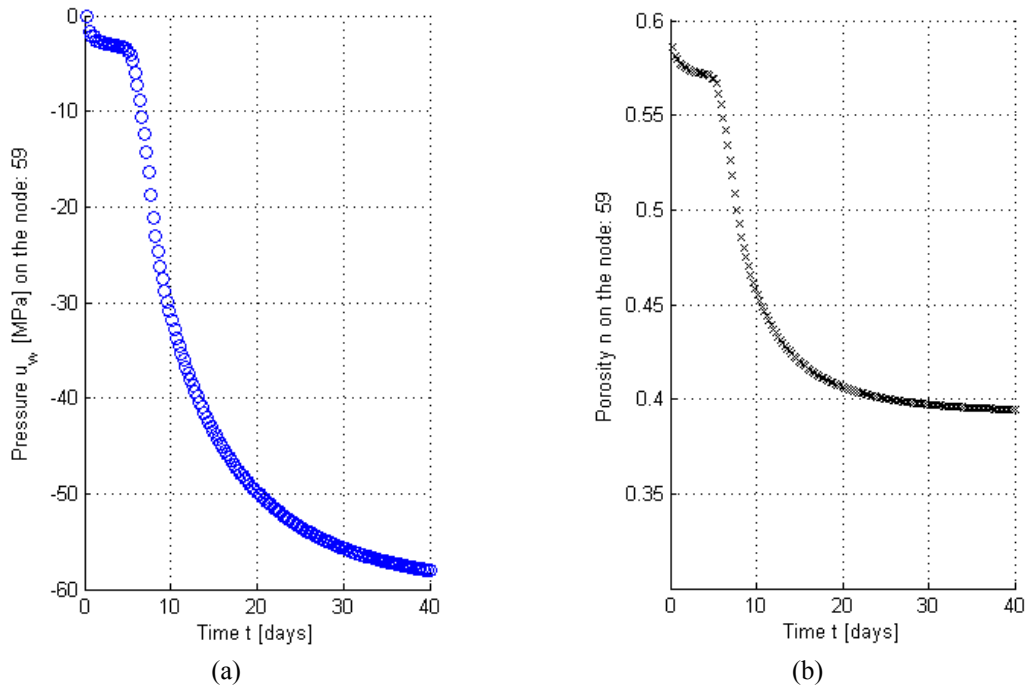


Figura 5.90 – Esquema CC09-PC02 con grieta lateral parcialmente propagada: a) variación de la succión; b) variación de la porosidad. Valores en el punto de referencia blanco, Figura 5.89a.

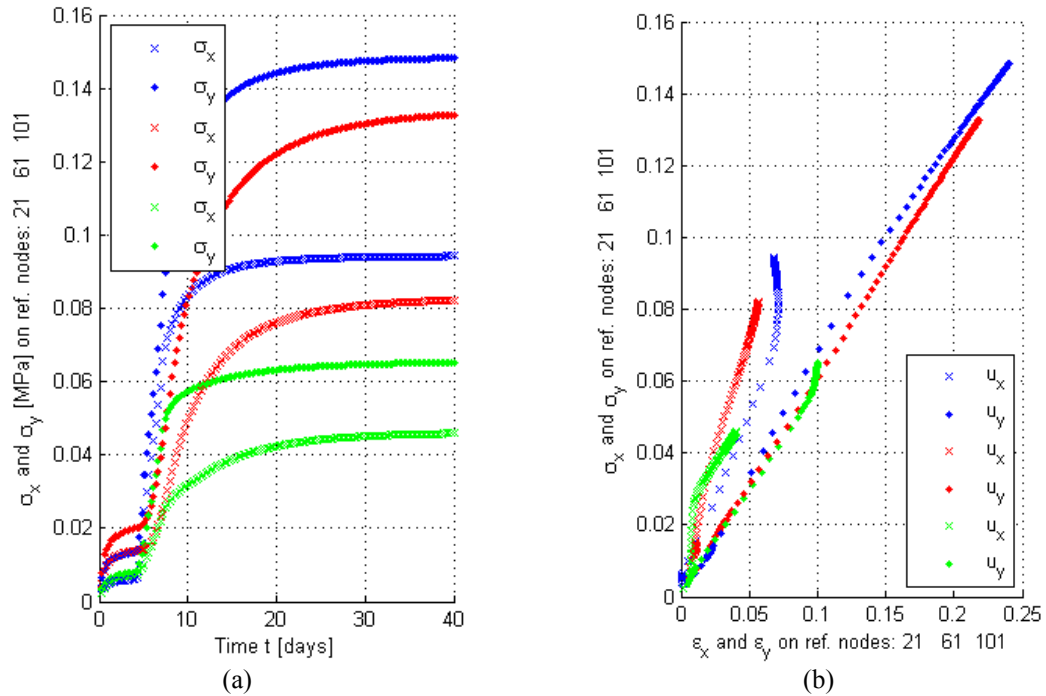


Figura 5.91 – Evolución de los parámetros y variables de tensión con el tiempo durante el proceso de desecación. Esquema CC09-PC02 con grieta lateral parcialmente propagada: a) tensiones horizontales y verticales en función del tiempo; b) tensión media vs deformación volumétrica.

5.4.3.7. Discusión de Resultados del Análisis de Dsecación de Muestras de 80 cm de Diámetro x 10 cm de Altura

La técnica de aplicación gradual de la condición de contorno en succión ha permitido reproducir la evolución de la succión medida en el laboratorio.

Con el esquema CC02-PC01 se reproduce bien la primera etapa de la desecación antes de que se formen grietas. Con el esquema CC03-PC01 se obtienen tensiones de tracción que justifican la formación de las primeras grietas observadas en muestras cilíndricas en el laboratorio. La combinación del esquema CC03-PC01 con la geometría de una grieta parcialmente propagada en el borde produce tensiones de tracción en la punta de la grieta que justifican la propagación de dicha grieta hacia el fondo de la bandeja. Finalmente, la combinación del esquema CC03-PC01 con la geometría de una grieta lateral que se ha propagado en toda la profundidad de la muestra, simula el efecto del nuevo contorno creado por la grieta en el proceso de desecación.

En las simulaciones presentadas, las grietas se han impuesto desde el principio de las simulaciones y son estáticas (no se propagan). Esta estrategia, permite el estudio de la influencia de la geometría de las grietas en el comportamiento del suelo sometido a desecación.

A medida que se avanza en el estudio de los resultados del modelo y se contrastan con los experimentos de laboratorio, se observa la necesidad de estudiar con mayor profundidad lo que sucede en los contornos de las muestras. Por otra parte, es necesario poder simular la evolución de las grietas con el tiempo para obtener resultados más precisos y que puedan ser calibrados con ensayos de laboratorio.

En el apartado siguiente se presentan los resultados de aplicar la técnica de separación de nodos (ver Capítulo 4 Modelo Numérico) a la simulación del inicio y propagación de la grieta lateral en contacto con la bandeja contenedora, de un ensayo de desecación sobre una muestra cilíndrica.

5.4.4. Análisis de la Dsecación de Muestras de Gran Tamaño

Se estudia en este apartado el ensayo de desecación sobre una muestra de suelo de 80 cm de diámetro \times 20 cm de altura. Es un ensayo representativo porque se trata de un ensayo de mediana escala, que tiene una duración de casi 120 días, lo cual le da un carácter de estacional respecto de lo que sucede en el campo. Además, presenta una evolución de la succión que va desde unos pocos kPa a casi 100 MPa. Por otro lado, es una geometría lo suficientemente grande como para obtener una buena respuesta hidromecánica con el modelo propuesto ya que, a lo largo de la investigación, se ha comprobado que existe una influencia notable de las dimensiones de la

geometría simulada en el comportamiento general del modelo. Es evidente, que la evolución del secado es más rápida cuando el espesor de la muestra es menor. A la diferencia natural de origen físico en el proceso de secado, se le añaden las dificultades numéricas cuando la geometría es muy pequeña. Se ha visto que geometrías de unas decenas de centímetros están mejor condicionadas desde el punto de vista numérico que las de muy pequeño espesor de solo unos milímetros.

El estudio exhaustivo de diferentes esquemas de trabajo ha permitido definir la mejor estrategia de simulación para estudiar la formación y propagación de una grieta. A lo largo del capítulo se ha mostrado la influencia que tienen sobre las variables fundamentales del proceso los cambios de las condiciones de contorno. El agrietamiento, desde un punto de vista numérico, es en esencia un cambio de condiciones de contorno que a su vez generan cambios que producen nuevas grietas.

Se presenta con este análisis, toda la potencia del modelo y de su implementación en MATLAB. Queda en evidencia tanto la complejidad del proceso de secado como la del modelo numérico para poder simular de forma adecuada la realidad observada en el laboratorio.

5.4.4.1. Ensayo sobre una Muestra de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura Secada en Ambiente de Laboratorio (Lakshmikantha, 2009)

Ésta es la muestra más grande que se utilizó en la tesis de (Lakshmikantha, 2009) y también la más grande que la cámara ambiental puede alojar. La bandeja contenedora tiene las características mostradas en la Figura 5.41a, con el fondo con ranuras que le dan rugosidad y produce restricciones a la retracción de la arcilla en desecación. La duración del ensayo fue de 119 días.

Se presenta el aspecto final del patrón de grietas en la superficie superior y la evolución de dicho patrón en la Figura 5.92. La primera grieta apareció alrededor del día 8. Las imágenes correspondientes a los días 10 y 12 muestran la propagación de esta grieta primaria. Como puede verse en la secuencia del agrietamiento, la primera grieta en aparecer está en contacto con la bandeja y se propaga aparentemente desde la superficie hacia abajo desprendiendo por completo el suelo de la bandeja. Del lado opuesto a la primera grieta se produce otra grieta menos evidente pero también en contacto con la bandeja y que se propaga siguiendo el contorno de la muestra hasta encontrarse con la primera grieta descrita y desprendiendo por completo la muestra de suelo de la bandeja. Como puede verse, hay porciones de suelo que han quedado parcialmente adheridas a las paredes del recipiente contenedor. La primera grieta no solo se propagó en la dirección vertical, sino que también lo hizo hacia el centro de la muestra desde los primeros instantes.

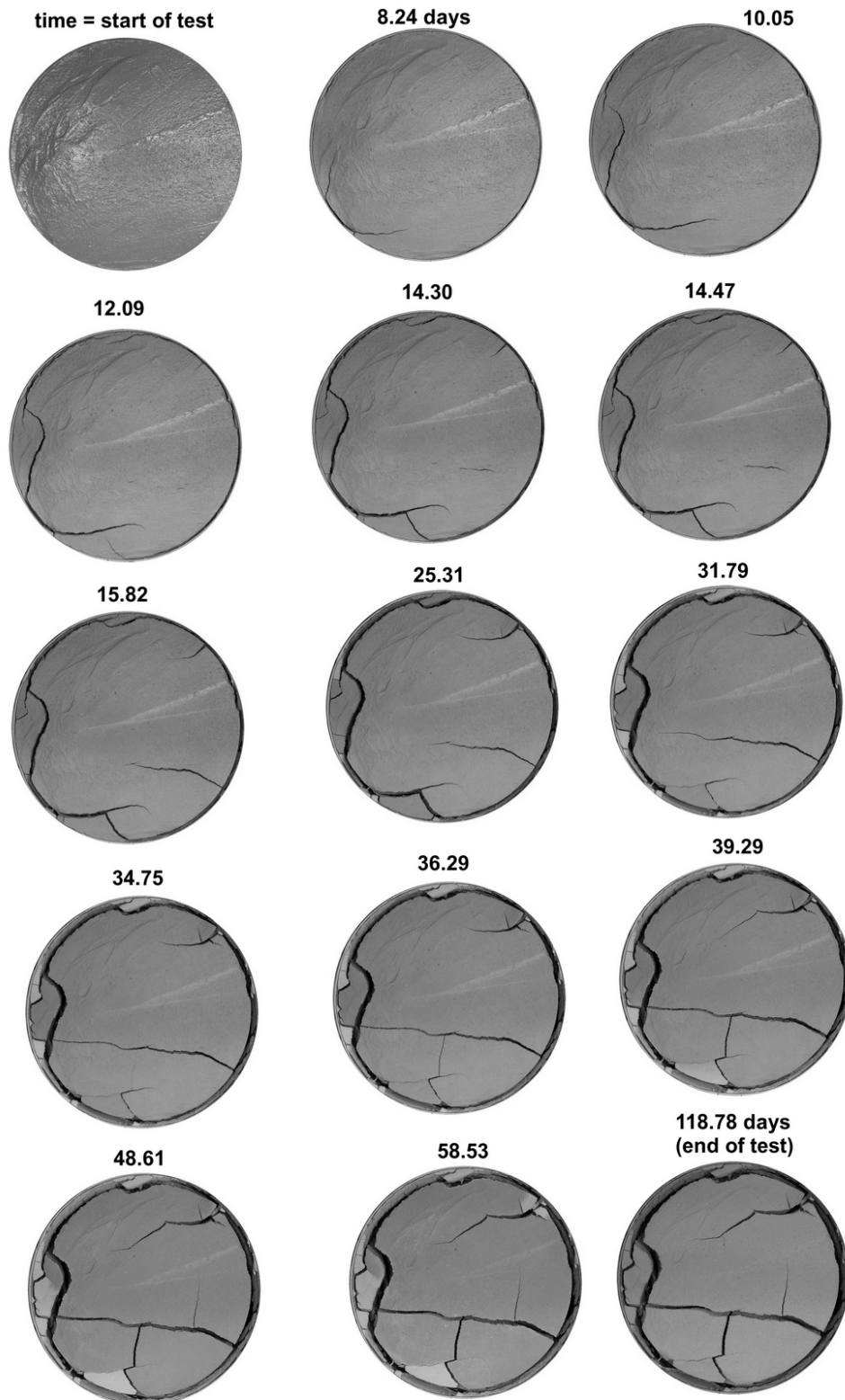


Figura 5.92 – Evolución del agrietamiento de la muestra de 80 cm de diámetro × 20 cm de altura (Lakshmikantha, 2009).

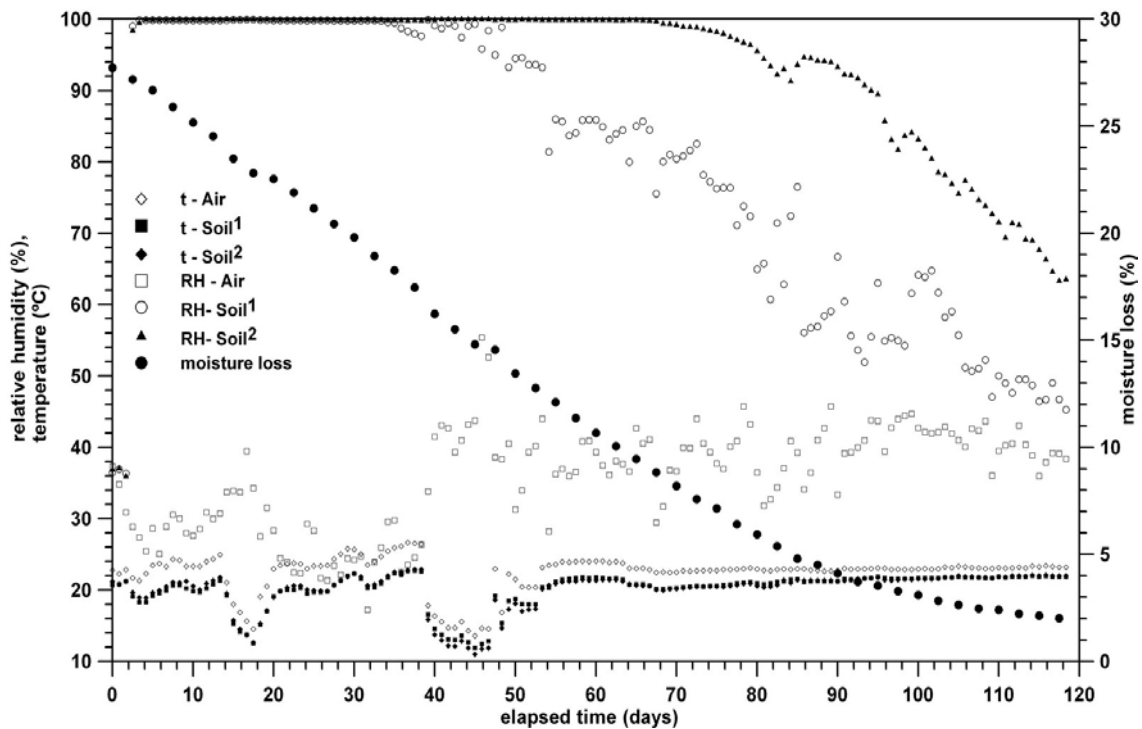


Figura 5.93 - Resultado de laboratorio sobre muestra circular de 80 cm \times 20 cm (Lakshmikantha, 2009).

En la imagen correspondiente al día 12 se ve una grieta en el cuadrante superior derecho que se propaga hacia el centro de la muestra y el día 14 aparece una grieta en el cuadrante inferior derecho en el interior de la masa de suelo que luego se propaga hacia la derecha terminando en el borde.

Tanto en este ensayo como en otros de trabajos anteriores (Lakshmikantha, 2009), así como también en los ejecutados en el contexto de esta tesis, se observa que el inicio de una grieta puede producirse prácticamente en cualquier punto de la matriz de suelo. Además, las grietas se pueden propagar en cualquier dirección. Hay, sin embargo, zonas preferentes de agrietamiento sobre todo al inicio del proceso como son los bordes de las bandejas. La dirección de propagación suele ser una línea más o menos recta sin cambios bruscos de dirección y por lo tanto las intersecciones entre grietas suelen producirse con un ángulo de 90°.

Después del desmantelamiento del ensayo se ha observado, además, que se han producido grietas desde el fondo de la muestra y que han evolucionado pero no alcanzado la superficie.

La Figura 5.93 muestra la evolución de la humedad global en la muestra, además de la temperatura y la humedad tanto del suelo como del ambiente de la cámara.

La Figura 5.94 muestra la evolución de la succión medida de manera indirecta a través de sensores de humedad relativa del suelo (Vaisala). Estos valores corresponden a los valores altos de succión a los que fue sometida la muestra de suelo en la cámara ambiental.

Normalmente, la temperatura del laboratorio es de $21 \pm 0.5^\circ\text{C}$, sin embargo, durante la ejecución de este ensayo hubo una avería del sistema de aire acondicionado. Por este motivo se ven oscilaciones de la temperatura y la humedad relativa del ambiente durante los primeros 50 días de ensayo. Sin embargo, la evolución de la pérdida de humedad no acusó fluctuaciones. La discrepancia en las lecturas de humedad relativa del suelo, a partir del día 39, se debe muy probablemente a que ese día se produjo una grieta que dejó expuesto el sensor Vaisala colocado justo donde se produjo la grieta.

5.4.4.2. Enfoque del Modelo de esta Tesis

Para un estudio detallado del inicio y propagación de las grietas en la muestra tridimensional, sería necesario caracterizar con precisión la heterogeneidad de la muestra de suelo, así como también la no uniformidad del perfil de succión y los defectos de la masa de suelo. Está claro que, comenzado el proceso, la muestra pierde toda simetría lo cual obliga a un análisis de la geometría al completo. Por otro lado, la detección del inicio y posterior propagación de las grietas sería posible solo con un algoritmo planteado en 3D tanto para el mallado inicial como para la posterior tarea de remallado o bien la elección de una metodología que incluya, en las capacidades del elemento, la posibilidad de modelar las grietas. Esta herramienta no está disponible aún en nuestras manos.

En ingeniería es tarea común tener que resolver problemas con ciertas herramientas que están disponibles y eso es lo que se hace a continuación. Se tiene el código basado en el modelo hidromecánico con capacidad para simular el inicio y progreso de una grieta y con ella se simula un ensayo que permite obtener respuestas y establecer conclusiones. Para ello se plantean dos estrategias diferentes: la primera, más sencilla, donde se ignora la existencia de las grietas y se intenta simular exclusivamente lo que sucede en el ensayo en términos hidromecánicos. En segundo lugar, se incorpora el estudio de una grieta y su evolución en el contacto entre suelo y bandeja. La grieta que se elige para el análisis es la primera que se inicia en la superficie de la muestra y que se propaga hacia abajo, siguiendo el borde en contacto con la bandeja y llega hasta el fondo del contenedor.

Siempre que se trabaja con modelos numéricos es una buena idea realizar varias simulaciones con distintas condiciones y comparar para asegurar que se está capturando el proceso físico que

se pretende estudiar. Esto es precisamente lo que se hace a lo largo del Capítulo y en este apartado.

5.4.4.3. Simulación del Ensayo sin Grieta sobre una Muestra Cilíndrica de 80 cm de Diámetro x 20 cm de Altura

En este caso se simula una geometría en dos dimensiones que representa una sección radial de la muestra cilíndrica (Figura 5.7). Resulta así una geometría de 40 cm de ancho por 20 cm de altura que presenta simetría axial. Las condiciones de contorno del problema se corresponden con el esquema CC03-PC01 de la Figura 5.8c. Se ha impuesto un valor de succión de 60 MPa en el contorno superior. Este valor es el que mejor ha permitido ajustar el ensayo y es un valor cercano a los valores de succión alcanzados en la muestra. La simulación transcurre en los 120 días que ha durado el ensayo en el laboratorio.

En la Figura 5.95, se muestra el estado al final del proceso de secado: *a)* Campo de succión en MPa; *b)* Campo de tensión horizontal en MPa; *c)* Campo de tensión tangencial en el plano XY en MPa; *d)* Campo de tensión media en MPa el día 120 de desecación. Se observa que el campo de succión ha evolucionado hasta alcanzar prácticamente el valor impuesto en el contorno de 60 MPa (Figura 5.95a). Como puede verse, existen tensiones horizontales capaces de producir grietas en el contorno superior derecho en contacto con la bandeja (Figura 5.95b). Por lo tanto, el modelo predice el lugar donde se produce la primera grieta, la existencia de tensiones horizontales que pueden producir una fisura mediante el mecanismo de apertura (Modo I) de la Mecánica de Fractura cuando se alcance el valor de la resistencia a tracción en la zona donde se producen tracciones.

Debido a la distorsión del campo de succión, a raíz de las deformaciones, las tensiones horizontales no son principales. En la Figura 5.95c se observa la existencia de tensiones tangenciales que confirman que las direcciones vertical y horizontal no son principales en el extremo derecho de la muestra y que contribuirían también a provocar agrietamiento en el contacto entre bandeja y suelo a la derecha si se supone otro mecanismo de fractura (por ejemplo: Modo II).

Que la tensión horizontal no sea principal justifica el hecho de que las fisuras no siempre sean perfectamente verticales y que a veces se produzcan más o menos paralelas a los bordes de la bandeja pero con cierta curvatura (ver Figura 3.37, Capítulo 3). Además, como ya se ha discutido antes, existe una diferencia entre la resistencia a tracción del suelo y la resistencia a la adherencia con la bandeja. Esto último condiciona el punto exacto de inicio de la grieta.

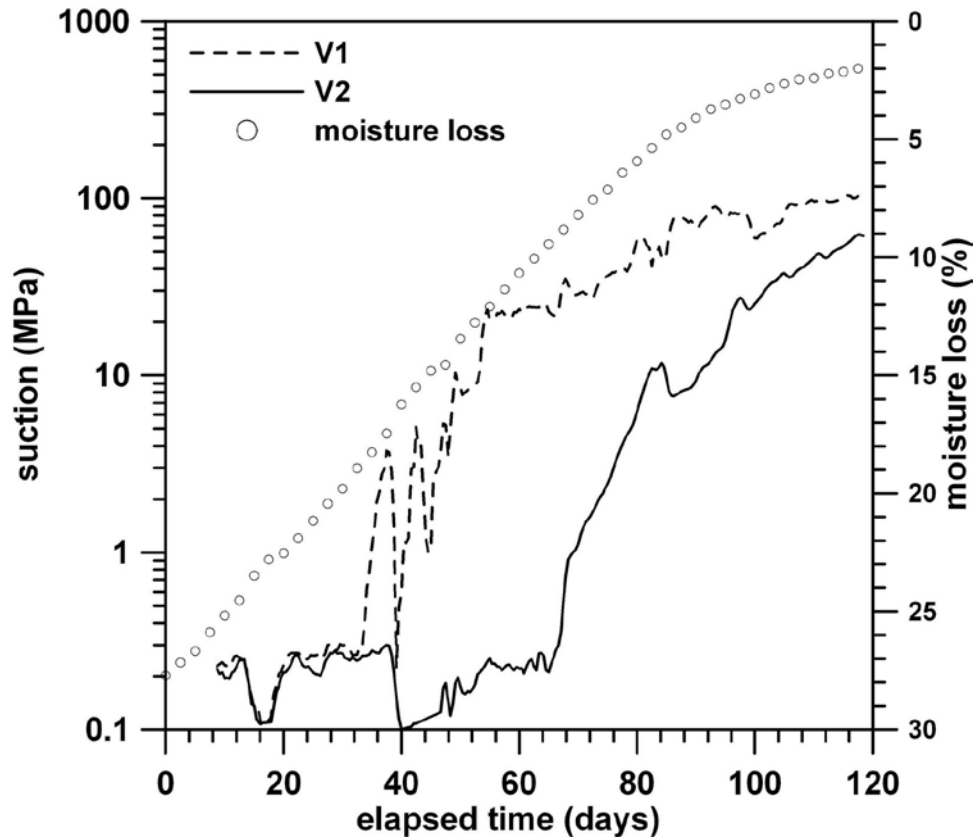


Figura 5.94 – Evolución de la succión y el contenido de humedad en la muestra de 80cm×20cm (Lakshmikantha, 2009).

En la Figura 5.96a, se observa que la evolución de la humedad que predice el modelo se ajusta bastante bien a la realidad, lo cual se ha conseguido ajustando los parámetros y tomando como humedad inicial el valor medido en el laboratorio. La evolución de la succión se parece bastante a la obtenida experimentalmente, teniendo presente que las mediciones en el laboratorio son de carácter oscilante y no muy uniformes. Las tres curvas de evolución de la succión mostradas en la Figura 5.96b corresponden a los puntos de referencia azul, rojo y verde indicados en la Figura 5.95. En estos puntos de referencia, alejados del borde, la distorsión del campo de succión es mínima y las tensiones horizontales y verticales son principales. Esto se acaba de verificar observando que las tensiones tangenciales (Figura 5.95c) en dicha zona son prácticamente nulas, salvo pequeños valores. El modelo está formulado considerando el suelo no saturado y por tal motivo la evolución de la succión es desde el principio considerable. Para poder reproducir el comportamiento al principio del ensayo, con succiones pequeñas, hay que utilizar otro conjunto de parámetros calibrados específicamente para dicho caso. En esta simulación se ha capturado el comportamiento global de todo el ensayo sin entrar en detalles finos.

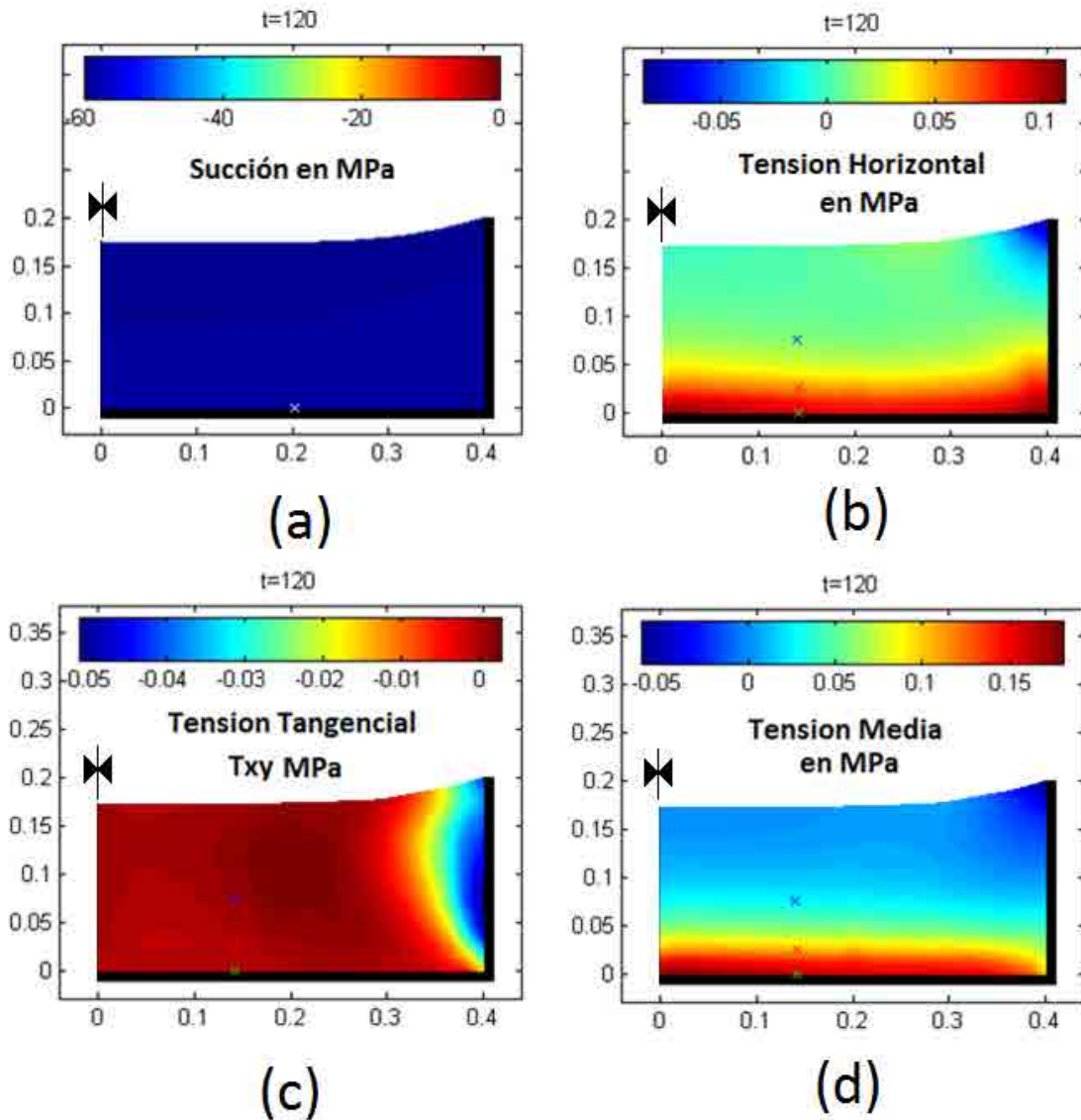


Figura 5.95 – Simulación sin grietas el día 120: a) Campo de succión en MPa; b) Campo de tensiones horizontales en MPa; c) Campo de tensiones tangenciales en el plano XY en MPa; d) Campo de tensiones medias en MPa.

En la Figura 5.96e se muestran los desplazamientos horizontales y verticales y en la Figura 5.96f la relación tensión-deformación de los puntos de referencia mencionados en el párrafo anterior.

En la Figura 5.97 se presenta el análisis en otros tres puntos de referencia en la vertical del borde derecho de la sección radial (Figura 5.97b). En la Figura 5.97c se observa la evolución de la tensión horizontal en la esquina superior derecha de la sección radial. En este punto la tensión de tracción evoluciona de tal forma que en un momento dado se alcanza el valor de la resistencia a tracción y se produce una grieta. La resistencia a tracción del suelo es muy baja, varía entre

0 y 0.0035 MPa para densidades naturales de entre 16-19 KN/m³, y para grados de saturación entre 30 y 75%, aproximadamente (Lakshmikantha, 2009), lo cual indica que en este modelo se predecirán inicios de grietas muy pronto. Esto es así debido a que se impone directamente succión en los contornos lo cual produce valores altos de tensiones netas desde el principio. Hay que estudiar en mayor profundidad que sucede con esta condición de contorno y como puede manejarse para tener un comportamiento de la simulación más ajustado con la realidad. La predicción del instante en que se forma la grieta fue problemático también en el trabajo de (Rodríguez, et al., 2007). Se ha visto en el apartado anterior que este problema se puede corregir aplicando la condición de contorno en succión de manera gradual. Otra manera de capturar la verdadera condición de contorno necesaria para reproducir el tiempo de inicio de agrietamiento sería modelar el aire en contacto con el suelo, pero esto queda fuera del alcance de la presente tesis.

Las Figura 5.97b y c muestran que el perfil de tensiones horizontales en el borde derecho de la sección radial analizada es de tracción en la superficie superior y luego de compresión antes de llegar a media altura desde arriba. En rigor, debido a la deformación la tensión principal mayor de tracción tendrá una dirección perpendicular a la curva que representa la superficie del suelo en contacto con el aire. Debido a que el punto donde se alcanza primero la condición de tracción está en contacto con la bandeja, la grieta se forma en dirección vertical y se propaga siguiendo el borde de la bandeja antes que la dirección principal de las tensiones de tracción.

En la Figura 5.97c se presentan los resultados en tres puntos de referencia. Se comprueba la existencia de tensiones de tracción, tanto en la dirección horizontal como en la vertical, con valores suficientes para provocar grietas (0.3 – 0.8 MPa, valores mayores que el proporcionado por la ecuación (5.10)).

En la Figura 5.97d, se presenta la evolución de la succión en los puntos de referencia. Se comprueba que la succión en la esquina superior derecha se mantiene en todo momento en 60 MPa que es el valor de la succión impuesta. La succión evoluciona más lentamente a medida que el punto está más profundo en la sección.

Sin embargo, como se ha visto en los ensayos (Figura 5.92), las grietas no siempre se dan en el contacto entre bandeja y suelo, sino que a veces se producen a cierta distancia del borde. La existencia de una zona relativamente grande con tracciones altas indica la posibilidad de que esto ocurra cuando la adherencia entre suelo y bandeja es mucho más alta que la resistencia a tracción del suelo. También hay que recordar que la resistencia a la tracción aumenta considerablemente con el secado y que las zonas de los bordes se secan más rápidamente debido a su mayor exposición al ambiente.

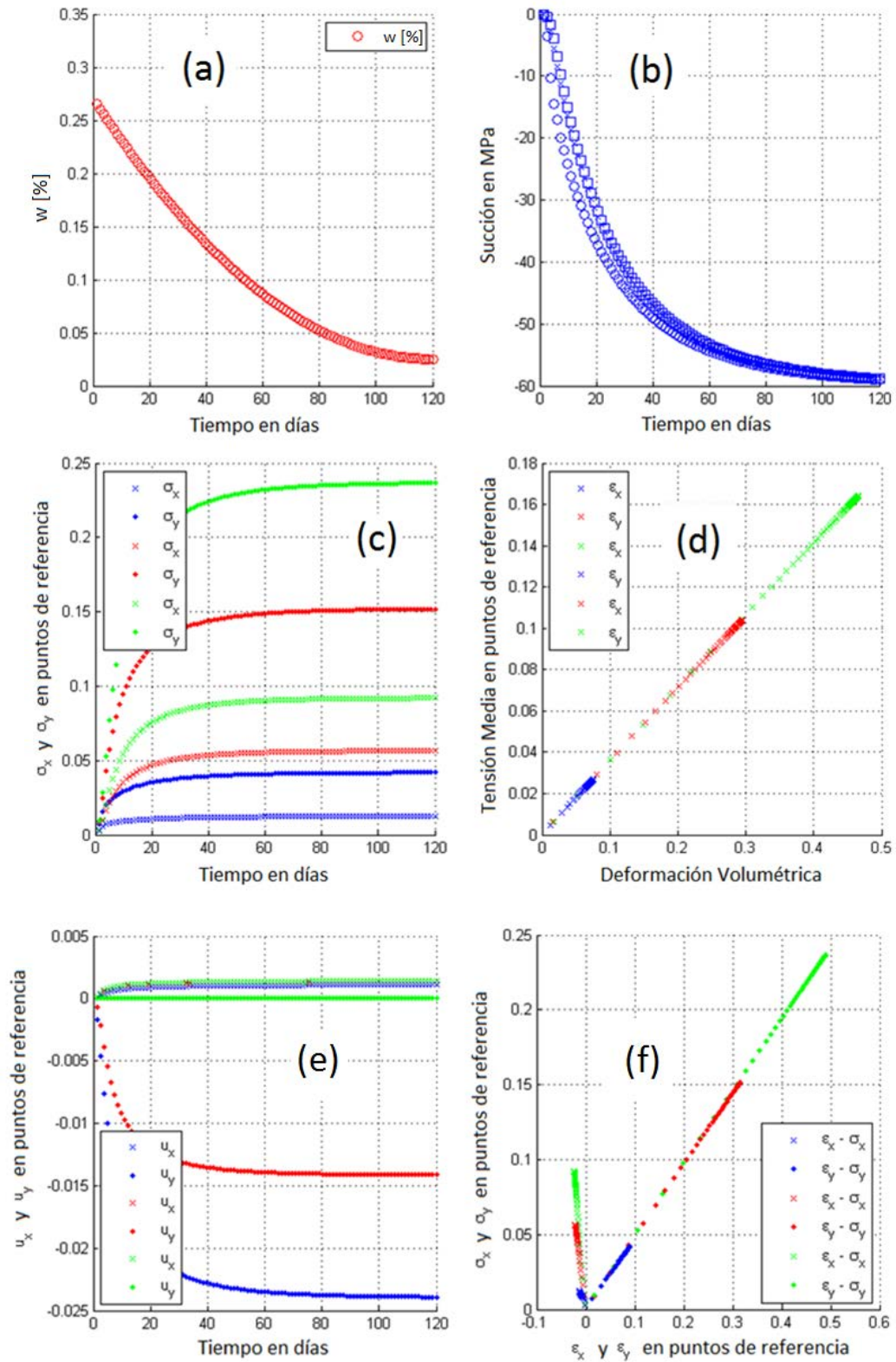


Figura 5.96 – Resultados del ensayo de desecación considerando que no hay grietas; a) Evolución de la humedad global de la muestra (%) con el tiempo en días; b) Succión en los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde); c) Evolución de las tensiones en los puntos de referencia; d) Relación tensión media vs deformación volumétrica en los puntos de referencia; e) Evolución de los desplazamientos en los puntos de referencia; f) Relación tensión-deformación en los puntos de referencia.

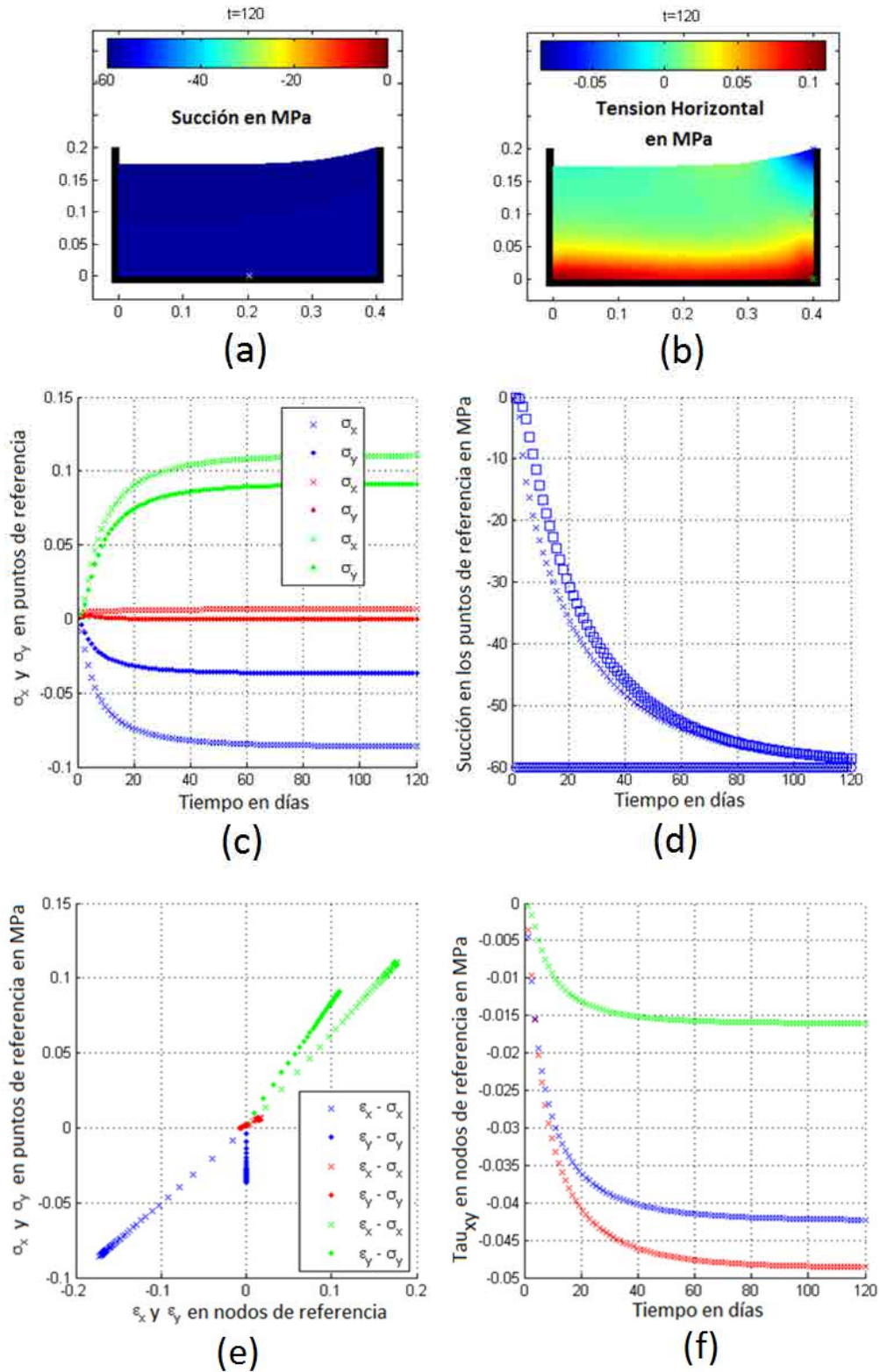


Figura 5.97 – Resultados del ensayo de desecación considerando que no hay grietas: a) campo de succión el día 120; b) campo de tensión horizontal el día 120; c) evolución de las tensiones horizontales y verticales con el tiempo en los puntos de referencia; d) evolución de la succión en los puntos de referencia; e) relación tensión-deformación en los puntos de referencia; f) evolución de la tensión tangencial en el plano XY en los puntos de referencia.

Por último, se comprueba una vez más que en la zona donde se ha producido distorsión del campo de succión aparecen tensiones tangenciales que evidencian que las tensiones horizontales no son principales. Esto justifica el hecho de que en los bordes, si bien es cierto que las grietas son esencialmente verticales, éstas no se producen exactamente en la dirección vertical sino que son más bien curvas (por ejemplo: Figura 5.48c).

En las Figura 5.97e y f se muestran, la relación tensión-deformación horizontal/vertical y la evolución de la tensión tangencial en los puntos de referencia.

5.4.4.4. Simulación del Ensayo con Agrietamiento sobre una Muestra Cilíndrica de 80 cm de Diámetro x 20 cm de Altura

En este último apartado de simulaciones se presenta la simulación del inicio y evolución de una grieta en el contorno derecho de la sección radial de una bandeja de 80 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Se justifica la aparición de las grietas en contacto con la bandeja debido a la presencia de tracciones suficientes como para vencer la resistencia a tracción del suelo que está en función de la humedad. Se simula el avance de dicha grieta hasta el fondo de la bandeja. Aunque en rigor habría que calcular la dirección de la propagación en función de la tensión principal máxima, se ha simulado por simplicidad la propagación vertical. Se ha aplicado la técnica de separación de nodos presentada en el Capítulo 4 Modelo Numérico, modificando la condición de contorno a medida que se alcanzó la resistencia a tracción del suelo. En la simulación la condición de inicio de agrietamiento se alcanzó el primer día. Aunque en el ensayo de la muestra de 80 cm de diámetro x 20 cm de altura la primera grieta se produjo el día 8, en los ensayos sobre muestras de 80/40 cm de diámetro x 10 cm de altura, la grieta se ha producido entre el día 1 y el día 10. Esto indica que la variabilidad en el tiempo de agrietamiento inicial es muy grande y tampoco se puede garantizar la repetitividad de los ensayos y los tiempos de inicio de agrietamiento.

Se ha logrado simular con bastante precisión la evolución del contenido de humedad y la retracción del suelo debido a desecación. Los valores de retracción de la muestra se corresponden con los obtenidos en los ensayos, lo cual da la pauta de que tanto la componente hidráulica como mecánica del programa funcionan correctamente.

Se ha considerado que el proceso se produjo en condiciones isotermas a pesar de algunas fluctuaciones en el laboratorio. La humedad relativa del ambiente ha sido mantenida alrededor del 40% en la mayor parte del ensayo. En la simulación se ha impuesto una succión constante igual a 60 MPa en el contorno expuesto a la atmosfera. Este valor ha permitido el mejor ajuste posible

aunque pueda considerarse un valor un tanto bajo respecto de lo medido en el laboratorio el cual alcanzó los 100 MPa.

En la Figura 5.99 se presenta la evolución del campo de succión durante los 120 días simulados. Se supone en este caso que no existe adherencia con el fondo de la bandeja aunque está impedida la separación de la misma. Así, una vez la grieta alcanza el fondo de la bandeja no existe posibilidad de que se formen otras grietas. La evolución de la grieta ha sido rápida debido a que las condiciones de tensiones de tracción superaron rápidamente la resistencia a tracción considerada, lo cual es consistente con los ensayos. Las dimensiones de las grietas se corresponden bien con las dimensiones obtenidas en el laboratorio.

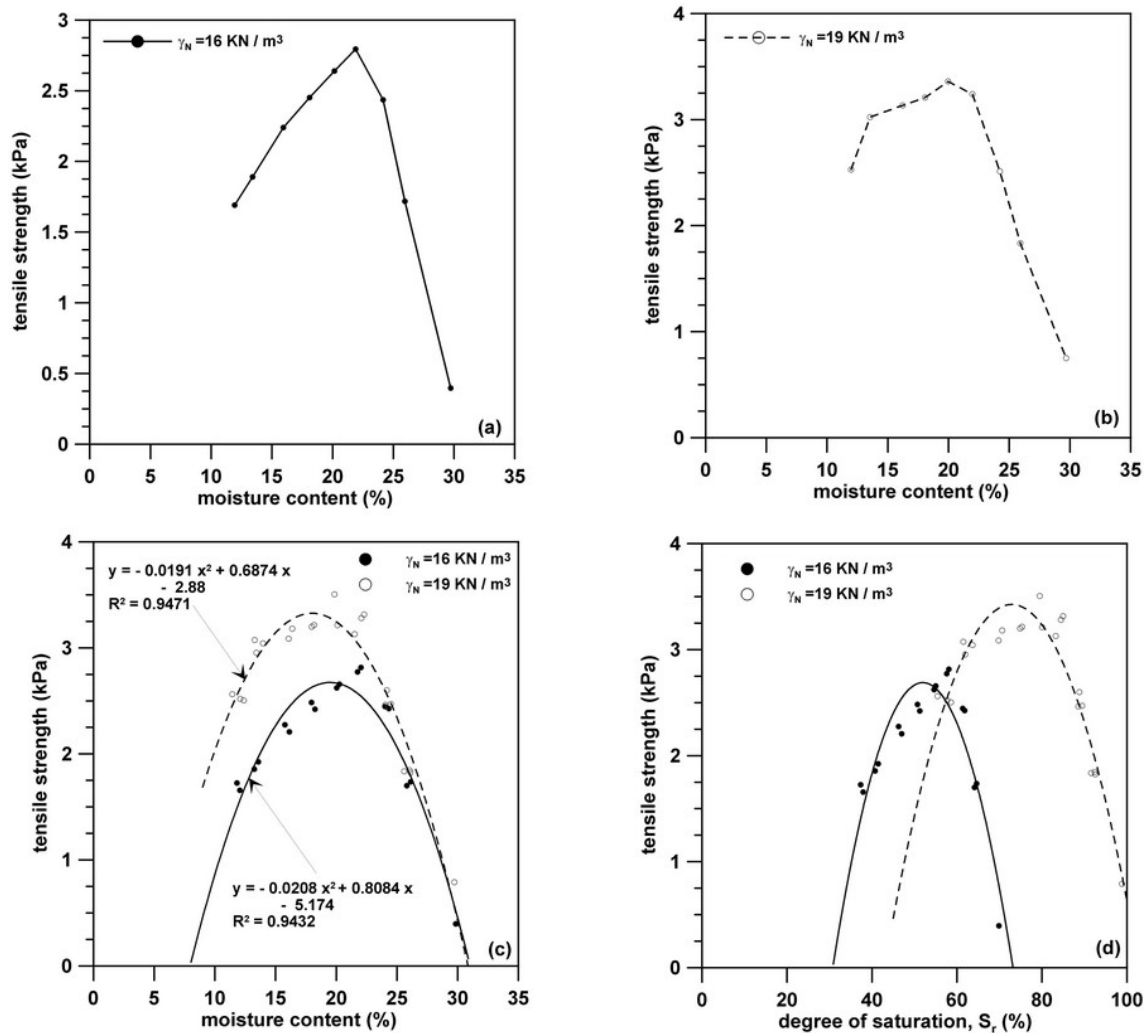


Figura 5.98 – a) y b) Resistencia a tracción vs humedad; c) resistencia a tracción vs humedad incluyendo todos los ensayos; d) resistencia a tracción vs grado de saturación (Lakshmikantha, 2009).

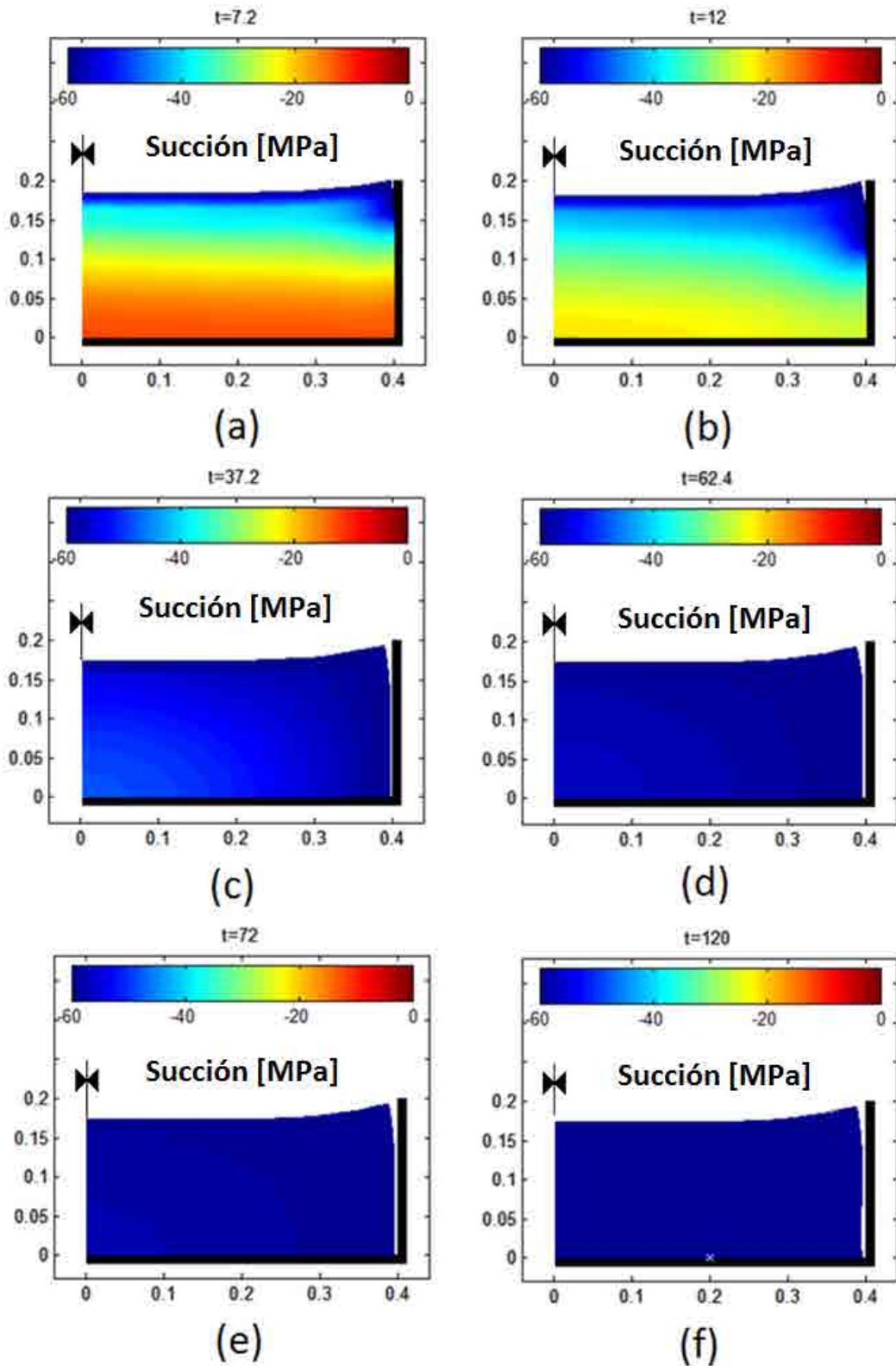


Figura 5.99 – Evolución del campo de succión durante secado y propagación de una grieta en el borde derecho en contacto con la bandeja contenedora: a) succión y grieta lateral a 7 días de secado; b) succión y grieta lateral a 12 días de secado; c) succión y grieta lateral a 37 días de secado; d) succión y grieta lateral a 62 días de secado; e) succión y grieta lateral a 72 días de secado; f) succión y grieta lateral a 120 días de secado.

Como condición de inicio de agrietamiento se ha utilizado la ecuación:

$$\sigma_t = -0.0191w^2 + 0.6874w - 2.88 \quad (5.10)$$

que se ha tomado del trabajo de (Lakshmikantha, 2009), y que corresponde a lo presentado en la Figura 5.98. En dicha figura se presenta la relación experimental analizada entre la resistencia a tracción, σ_t y la humedad del suelo, w .

La aparición y evolución de la grieta ha modificado la variación de las tensiones normales respecto del tiempo. El contenido de agua ha evolucionado ligeramente más de prisa (Figura 5.100a).

En la Figura 5.100b se presenta la evolución de la succión durante el ensayo en los tres puntos de referencia (azul, rojo y verde) mostrados en la Figura 5.95. Esta evolución presenta una pequeña diferencia, respecto del caso sin grieta analizado antes, mostrando una evolución más rápida de la variable de succión.

En la Tabla 5.3 se resumen los parámetros utilizados en la simulación. Se ha tenido que utilizar un valor bastante pequeño de permeabilidad para poder calcular el proceso de desecación, pero de todas maneras no se aleja demasiado de los valores usuales para las arcillas.

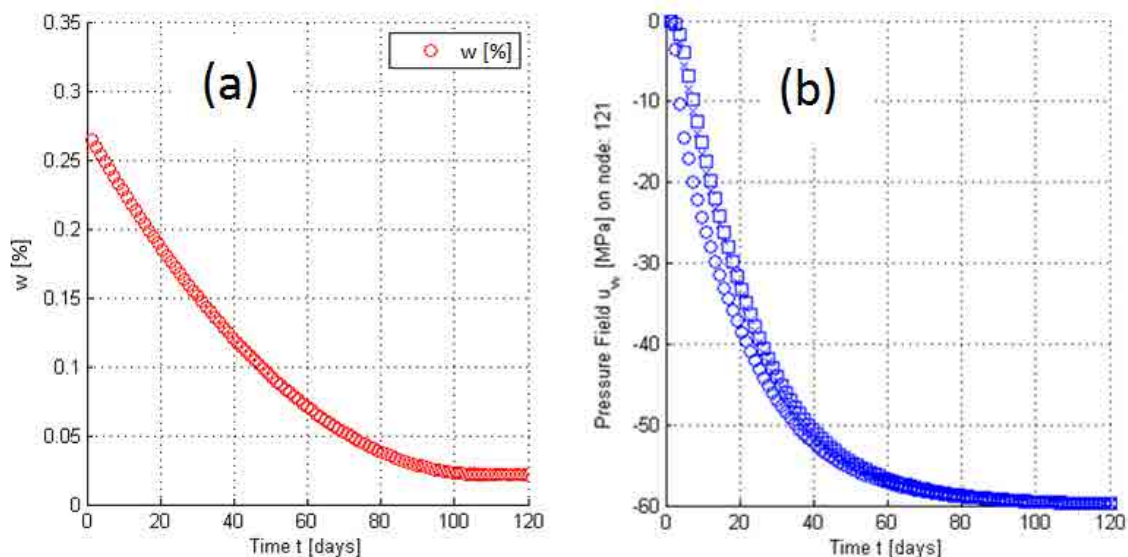


Figura 5.100 – Simulación de ensayo con agrietamiento: a) evolución de la humedad de la muestra en el tiempo; b) evolución de la succión en tres puntos de la sección radial.

Tabla 5.3 – Parámetros utilizados para la simulación de desecación

PARÁMETROS DEL MODELO						
Parámetros mecánicos						
a_1	a_2	a_3	a_4 (MPa)	P_{ref} (MPa)	ν	G
-0.02	-0.0025	-0.000039	0.023	0.1	0.4	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$
Parámetros de la curva de retención						
P_0 (MPa)	λ	n_0				
1.05	1.55	0.6				
Parámetros hidráulicos						
k_0 (m/s)	b	n_0	r			
9.27×10^{-10}	25	0.6	3			

Tabla 5.4 – Parámetros de la curva de retención para la arcilla de Barcelona, succión en MPa (Barrera, 2002).

e	γ_d (g/cm ³)	α (f_n)	m (λ)	n (porosidad)
0.87	1.45	0.828	1.524	0.545
0.75	1.55	0.756	1.447	0.527
0.64	1.65	0.485	1.554	0.479
0.55	1.75	0.033	3.052	0.373
0.53	1.77	0.066	2.420	0.380

En la Tabla 5.4 se cita el trabajo de (Barrera, 2002) que ha caracterizado la curva de retención para el suelo de Barcelona. Estos parámetros corresponden a la curva de retención de (VanGennuchten, 1980).

5.4.4.5. Discusión de Resultados de la simulación de Muestra de 80 cm de Diámetro x 20 cm de Altura

El modelo numérico se comporta adecuadamente para simular el proceso de desecación y de agrietamiento del suelo. Se ha podido implementar un algoritmo capaz de iniciar y propagar una grieta utilizando un criterio de resistencia a tracción y una técnica de liberación de nodos (Ver Capítulo 4 Modelo Numérico). El problema hidráulico es de difícil solución numérica por su no linealidad y porque la imposición de la condición de contorno en succión genera cierta inestabilidad al sistema. La propagación de la grieta introduce mayor inestabilidad y requiere de cuidado para mantener el equilibrio puesto que se introducen desequilibrios cada vez que se libera un nodo. El cambio en las condiciones de contorno afecta al campo de tensiones en las inmediacio-

nes de la grieta y estas tensiones se deben redistribuir en la matriz de suelo. A pesar de las complicaciones derivadas de la implementación y la puesta a punto del modelo, se ha demostrado que es posible simular el proceso de secado y de agrietamiento con una técnica relativamente sencilla.

La primera grieta que se ha formado en el contorno y que se ha propagado en parte hacia el fondo de la bandeja puede estudiarse numéricamente en dos dimensiones.

Se ha visto en el laboratorio una gran variabilidad en el tiempo de inicio de la primera grieta entre 1 a 10 días en los ensayos. Esta grieta es la primera grieta visible en la superficie. Como se ha visto en el Capítulo 3, Análisis Experimental, no hay garantías de que la primera grieta comience siempre en el contorno superior, aunque es probable que así sea cuando se garanticen las condiciones de contorno adecuadas y se asegure un mínimo de homogeneidad en la muestra. El modelo numérico ha demostrado las razones de inicio de agrietamiento en los bordes por un estado de tensiones de tracción que la muestra no puede mantener.

La velocidad de la propagación de la grieta es relativamente grande durante los ensayos. El modelo permite propagar la grieta en longitudes proporcionales a la longitud de la cara del elemento finito por lo que en principio se puede ajustar a las mediciones hechas en el laboratorio.

Los parámetros del modelo se han calibrado utilizando toda la información disponible del ensayo. Sin embargo, para calibrar apropiadamente los parámetros hidromecánicos, deberían diseñarse ensayos más simples sobre los que se tenga mayor control de un número menor de variables. Por otro lado, debido a la variabilidad natural del fenómeno, es necesario realizar un gran número de ensayos para hacer un estudio estadístico del comportamiento de algunas variables, como el tiempo en el que aparece la primera grieta.

"Cada día sabemos más y entendemos menos".

Albert Einstein (1879-1955)

Capítulo 6

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

El problema de desecación y agrietamiento es sin duda complejo. Presenta complejidad en cuanto al comportamiento constitutivo debido a la no linealidad. Presenta complejidad, además, debido a que el medio es **multifase** e incluye **fenómenos acoplados** como el flujo en medio poroso deformable. Se añade además la **interacción de fisuras con el medio**, lo cual produce **no linealidad** debido a los **cambios en la rigidez global de la matriz de suelo**. Presenta la dificultad de caracterizar el **medio heterogéneo** y el **análisis de datos** de laboratorio tampoco es sencillo puesto que la medición de las variables presenta cierta dificultad y los datos capturados son en general de **carácter oscilatorio** por un lado y **aleatorios** por otro.

El **origen de las grietas** es esquivo puesto que se debe a **varios factores**. Algunos de estos factores pueden estudiarse de manera determinista, como son las grietas por tracción debida a retracción por desecación y a las condiciones de contorno que impiden dicha retracción. Hay otros factores, de **características aleatorias**, que deberían estudiarse mediante la teoría de la probabilidad, como por ejemplo la **distribución aleatoria de la heterogeneidad, imperfecciones, micro-fisuras**, etc.

En la experiencia de laboratorio realizada para esta tesis se ha observado que el comportamiento de las grietas por desecación es errático y por ahora impredecible en cuando a los detalles se refiere. Si bien es cierto que los patrones de grietas presentan cierta consistencia y similitud, *predecir donde se producirá la primera grieta o hacia donde propagará una grieta existente, para el caso general, es muy complejo.*

Según se ha podido medir en laboratorio y se ha podido simular numéricamente *existen ciertos estados de tensiones que favorecen y que producen las condiciones necesarias para iniciar y propagar grietas*, pero parece claro que esta no es la única explicación al fenómeno.

Evidentemente, existen diversos resultados cuando se utilizan **suelos distintos** en la investigación de los procesos de desecación y agrietamiento. Es también evidente, la necesidad de comparar resultados para distintos suelos, para así definir, cómo afectan los parámetros materiales al comportamiento en desecación y agrietamiento.

El comportamiento de los extremos de las muestras está relacionado con el **fenómeno de arqueo**, muy evidente en suelos de alta plasticidad sometidos a desecación sin restricciones y poco presente en suelos de baja plasticidad que usualmente presentan agrietamiento. Se ha observado la formación de un arqueo en el plano vertical en la mayoría de los casos. Este arqueo puede explicarse por la existencia de desecación diferencial y un perfil de rigidez entre las superficies superior e inferior de la muestra.

Se ha observado que las fisuras pueden propagarse desde la superficie del suelo (en contacto con la atmósfera) hacia el interior, pero también en dirección opuesta, partiendo de la superficie inferior de la muestra hacia la superficie exterior. Estas fisuras no necesariamente atraviesan todo el material, sino que puede detenerse en un punto intermedio e incluso cambiar su dirección. Cuando el fondo de la bandeja contenedora tiene rugosidad, la morfología de **la red de fisuras en superficie es en general diferente en las caras superior e inferior de las muestras**, sugiriendo la posibilidad de **mecanismos distintos de fisuración en la cercanía de ambas caras**. *Cuando el fondo de la bandeja es liso, la configuración de grietas es similar en las caras superior e inferior y consta principalmente de grietas verticales.*

La heterogeneidad del suelo tiene una gran influencia en la formación y propagación de las grietas. Caracterizar esa heterogeneidad es difícil pero necesario si se pretende comprender en profundidad como se producen las grietas.

El modelo numérico ha permitido concluir que las condiciones de contorno a la que está sujeto el suelo son determinantes y marcan un camino a seguir en los futuros ensayos. *Surge de esta investigación la necesidad de efectuar ensayos simples de desecación, que junto a las simulaciones, permita dilucidar el efecto de dichas condiciones de contorno para un tipo determinado de suelo.*

En los futuros modelos es necesario mejorar el tratamiento de las condiciones de contorno en succión. En la realidad el ambiente no impone bruscamente succión en el contorno del suelo sino que se trata de un proceso gradual debido a la existencia de un efecto de capa límite entre el aire y el suelo. Una manera de hacerlo es simular no solo la masa de suelo sino también el aire en contacto con la muestra.

Incorporar un modelo de juntas para tratar las grietas es indispensable ya que se ha visto que el contacto entre bandeja y suelo en el laboratorio es un proceso complejo. Otro camino, es modelar la bandeja y el problema de contacto con el suelo durante el proceso de desecación.

Expandir el modelo a 3D es vital para comprender el proceso en condiciones de contorno complejas. Unas condiciones en apariencia sencillas, como puede ser una bandeja de suelo en desecación en el laboratorio, es sin embargo un proceso tridimensional, ya que tanto las condiciones de contorno en succión como las grietas, no presentan simetría alguna siquiera desde el principio del ensayo.

Para tratar las grietas (inicio y propagación) se puede optar por varios caminos. Las técnicas de remallado parecen ser el camino más intuitivo pero tienen un costo computacional y complejidad de implementación muy elevados. Las discontinuidades fuertes son también una opción pero, en opinión del autor, demasiado compleja y que añaden complejidad al problema numérico en sí. La opción de utilizar nuevos métodos como el XFEM, son las alternativas más viables, por su mayor sencillez y menor demanda de tiempo de cálculo.

6.1. Conclusiones de la Vertiente Experimental

Del estudio del Estado del Arte y del estudio experimental se puede establecer y clasificar las variables y factores involucrados en el proceso de desecación en el laboratorio. Las **Variables** que gobiernan el proceso son la **temperatura** y la **humedad relativa del ambiente** en el laboratorio. En el campo se añade la velocidad del viento. Existen además, **factores extrínsecos** en el laboratorio: tamaño de la muestra (definido por la bandeja contenedora), rugosidad y adherencia de la bandeja contenedora, etc. y en el campo, la posición del nivel freático es un factor que hay que tener en cuenta. Los **factores intrínsecos** son la fábrica (heterogeneidad, estructura, imperfecciones, impurezas del suelo), contenido de agua inicial, tamaños de partículas iniciales, plasticidad, resistencia a tracción, tenacidad a la fractura, etc. Evidentemente, las variables extrínsecas son las que vienen impuestas por el ambiente exterior. Las variables intrínsecas en cambio son inherentes al suelo y a su naturaleza.

En esta Tesis Doctoral, se presenta un programa experimental, que incluye una técnica de auscultación tridimensional mediante Georadar, sobre muestra cilíndrica de suelo (*80 cm de diámetro x 10 cm de altura; 50.27 litros*). Un estudio de muestras rectangulares de pequeño espesor, para analizar la influencia del tamaño máximo de partículas inicial (*35.1 cm x 25.4 cm x 1 cm; 0.09 m²*) y la influencia de la relación de lados de las bandejas (*59.4 cm x 42 cm x 1 cm; 0.25 m²*) en el patrón final de agrietamiento, utilizando una técnica de análisis de imágenes. El

análisis de un ensayo de secado rápido en Cámara Ambiental (CA) de una muestra cilíndrica (*40 cm de diámetro x 10 cm de altura; 12.6 litros*), para analizar el efecto de la temperatura en el proceso de secado y agrietamiento. Finalmente, se presenta un ensayo de ciclos de secado, humedecimiento, inundación, secado y humedecimiento también en muestra cilíndrica (*80 cm de diámetro x 10 cm de altura; 50.27 litros*).

Respecto de la técnica de auscultación, se ha estudiado un volumen prismático de suelo (*30 cm de ancho x 30 cm de largo x 10 cm de altura; 9 litros*), durante un semi-ciclo de secado, para detectar grietas no visibles en superficie utilizando un sistema portátil de Georadar (*StructureScan Mini de GSSI*). Se ha diseñado una metodología de trabajo y se ha demostrado que el sistema es sensible y útil para la detección de ciertas grietas durante el proceso de secado que son invisibles desde la cara superior de la bandeja contenedora. El sistema detecta grietas a partir de *1-2 mm* de grosor y es capaz de determinar distancias entre grietas cuando estas están a más de *5 cm* entre sí, lo cual es muy útil en muestras de *10 cm* de altura en adelante, como las muestras cilíndricas analizadas en esta tesis. Se identifican grietas que comienzan desde el fondo de la muestra, permitiendo la definición del instante de la generación. Esto amplía la posibilidad de estudio de la morfología de las grietas invisibles en superficie en función del tiempo (*donde y cuando se inician, en el interior o debajo de la muestra de suelo*).

Respecto de los ensayos en bandejas rectangulares, se estudia y cuantifica, usando análisis de imágenes, la influencia que tiene el tamaño máximo de partícula utilizada para preparar el lodo fluido en los ensayos. Se ha podido comprobar que la morfología de las grietas cambia considerablemente en aspecto y en la cantidad de superficie agrietada. Con tamaño máximo de partículas de *0.42 mm* las grietas ocuparon el *5.88%* de la superficie de la muestra, mientras que con tamaño máximo de *0.104 mm* las grietas ocuparon el *7.94%*, de la superficie en muestras de *351 mm x 254 mm x 10 mm*. En suelos más finos, las grietas son más abundantes, más definidas y no presentan ramificaciones capilares.

Se estudia la influencia de la relación de lados de las bandejas contenedoras en el patrón final de agrietamiento, demostrando que se puede tener cierto control sobre dicho patrón modificando las condiciones de contorno del suelo en desecación.

Relaciones de lados mayores a *1:10* producen grietas paralelas entre sí y perpendiculares a la mayor longitud de la muestra. Relaciones de lados menores a *1:10* producen un entramado de grietas primarias, secundarias, terciarias, etc. que definen celdas de tamaño uniforme en toda la muestra.

Respecto del ensayo de secado rápido, se ensaya una muestra cilíndrica (*40 cm de diámetro x 10 cm de altura; 12.6 litros*) y se ha demostrado que la temperatura tiene un efecto importante en el proceso. En este ensayo se ha conseguido producir una grieta central, que se origina en el centro de la probeta y se propaga a lo largo de todo el diámetro de la muestra, y que no se ha producido en ensayos anteriores del mismo tamaño (Lakshmikantha, 2009). La mayor temperatura y la menor humedad relativa del ambiente a la que se ejecutó este ensayo, en comparación con los anteriores (*45°C, HR 30% vs 21-35°C, HR 40%*), ha acelerado el proceso de secado y ha definido zonas con características diferentes en la muestra. Las zonas bajo las lámparas halógenas han secado antes rigidizando el suelo, mientras que la zona central más blanda y sometida a tracciones ha permitido el desarrollo de una grieta central a lo largo del diámetro de la muestra.

Respecto de los ensayos en muestras cilíndricas, se puede concluir que en este tipo de muestras (*80/40cm de diámetro x 20/10 cm de altura; 50.27/12.6 litros*) existen dos tipos de grietas:

Tipo 1: son grietas bien definidas, que atraviesan toda la altura de la muestra, son verticales y se producen generalmente desde la superficie en contacto con la bandeja contenedora y se propagan hacia abajo. También se producen en el medio de la masa de suelo y propagar hacia arriba o hacia abajo.

Tipo 2: son grietas curvas o radiales, se producen desde la superficie inferior y propagan hacia arriba sin propagar todo el espesor de la muestra. Algunas de las grietas curvas son concéntricas unas con otras.

Respecto del ensayo de ciclos, se ha hecho una mejora de las características de la CA para simular, en laboratorio, cambios y ciclos de parámetros medioambientales tales como temperatura, humedad (ambiental o inundación), mejorando las prestaciones ya existentes de la CA especialmente en la simulación de ciclos sequía-inundación. Se realiza un **ensayo de ciclos** en muestra cilíndrica (*80 cm de diámetro x 10 cm de altura; 50.25 litros*) que persigue el objetivo de asegurar que los tensiómetros son capaces de medir los cambios de la succión en el suelo debido a los cambios de humedad de la cámara. Se comprueba que los tensiómetros son sensibles al aumento de humedad en la CA y a la inundación. También se comprueba que los tensiómetros siguen midiendo succión, en un segundo semi-ciclo de secado, luego de un ciclo de secado-humedecimiento e incluso luego de un ciclo de secado-humedecimiento e inundación. Se comprueba que el efecto de la inundación de la muestra es evidente y radical, produciendo una gran cantidad de grietas nuevas sobre todo junto a las grietas existentes. Este efecto se debe

a que el campo de succión cambia bruscamente llegando la matriz de suelo a su resistencia a la tracción en varios puntos a la vez. Además, al humedecer una arcilla aumenta su volumen, pero también disminuye la succión y eventualmente su resistencia a tracción, lo que puede originar nuevas fisuras.

Del programa experimental en general se ha concluido siguiente:

Se verifica que partiendo de condiciones saturadas, las grietas se inician cuando el grado de saturación es todavía muy elevado. Por tanto, pueden aplicarse los postulados clásicos de la Mecánica del Suelo Saturado (por ejemplo se puede trabajar en tensiones efectivas).

Puede considerarse que la fisura se inicia cuando en un punto y en una dirección la tensión supera la resistencia a tracción del suelo, que depende de la succión. La condición de inicio de la grieta depende por tanto del estado de tensiones, pero también de la presión intersticial negativa (succión), y por tanto del problema hidráulico. Sin olvidar la dependencia respecto de las condiciones de contorno del problema global.

Se observa que, una vez iniciada la fisura, las condiciones de contorno del problema mecánico y del problema hidráulico cambian. En particular, la existencia de una grieta aumenta la superficie por la que se puede evaporar agua y por tanto puede acelerarse el proceso de secado.

Se comprueba que la morfología de la red de fisuración observable en superficie depende de múltiples factores tales como el tamaño (*sobre todo el espesor*) y forma de la muestra, el tipo de contacto entre la muestra y el contenedor. Se observa que las fisuras pueden propagarse desde la superficie del suelo (en contacto con la atmósfera) hacia el interior, pero también en dirección opuesta, partiendo de la superficie inferior de la muestra hacia la superficie exterior.

Se comprueba que estas fisuras no atraviesan necesariamente todo el material, sino que pueden detenerse en un punto intermedio e incluso cambiar su dirección. La morfología de la red de fisuras es en general diferente en las caras superior e inferior de las muestras (*sobre todo cuando el fondo es rugoso*), sugiriendo la posibilidad de mecanismos distintos de fisuración en ambas caras.

Se comprueba que la propagación de la fisura presenta una gran dependencia del tamaño de la muestra. Este efecto de tamaño es consistente con los resultados de la Mecánica de la Fractura que serían de aplicación en este caso.

En función del contacto suelo-bandejas se observa que algunas fisuras se pueden desarrollar en dicho contacto, antes que en la superficie del suelo. Eso puede dar lugar también a morfologías más complejas, con “porciones de suelo aisladas” que se arquean por diferencia de desecación

en la superficie y en profundidad en función del perfil de rigidez producido por el frente de succión.

En la mayoría de las muestras ensayadas se observa que las células de material intacto que se generan entre fisuras presentan un arqueado en el plano vertical. Este arqueado se explica por la existencia de desecación diferencial entre las superficies superior e inferior de la muestra. Aunque en algunos ensayos descritos en la literatura este arqueado puede ser convexo.

Todas estas cuestiones, permiten tener una mayor comprensión de los mecanismos de formación y propagación de las grietas por desecación.

Se realizan ensayos que demuestran que la grieta puede comenzar en cualquier punto de la muestra y propagar en cualquier dirección aunque hay zonas donde se puede predecir el agrietamiento como los bordes de las muestras en contacto con las bandejas. También se puede predecir la dirección de la propagación según la relación de lados de las bandejas rectangulares.

6.2. Conclusiones de la Vertiente Teórico-Numérica

Se ha presentado un modelo numérico que incluye la Ecuación de Equilibrio de suelos no Saturados y la Ecuación de Balance de la masa de agua de la Mecánica de Medios Continuos de manera acoplada y general. Para las ecuaciones constitutivas se ha optado por la ecuación de Darcy generalizada para la componente hidráulica y un modelo Elástico no Lineal basado en el concepto de Superficies de Estado para la componente mecánica.

Se presenta una metodología de trabajo con el modelo implementado en entorno MATLAB²² permitiendo el análisis de diferentes tipos de condiciones de contorno que representan lo que sucede en el laboratorio durante un ensayo de desecación.

Se presenta además, una técnica para incorporar al modelo hidromecánico la posibilidad de simular el proceso de agrietamiento utilizando un criterio basado en la Resistencia de Materiales Clásica en cuanto al problema de rotura y una técnica numérica de liberación de nodos (*remallado elemental*) para iniciar el proceso de fisuración y seguir el proceso de propagación de la grieta. Se resuelve la pregunta de cuando y donde comienza la grieta estableciendo el criterio de la Resistencia de Materiales Clásica: la grieta comienza en un punto de la matriz de suelo cuando la tensión principal menor alcanza la resistencia a tracción de la arcilla en función

²² MATLAB: (abreviatura de MATrix LABoratory) es una herramienta de software matemático.
<http://uk.mathworks.com/products/matlab/>

del contenido de agua (o en función de la succión). La dirección de propagación es perpendicular a la dirección de la tensión principal menor (*de tracción*), salvo que se conozca de antemano dicha dirección como en el caso de la grieta en contacto con la bandeja contenedora del suelo.

Finalmente, se presenta una propuesta de cómo aplicar la MFLE al problema de desecación de suelos arcillosos.

En los ensayos de laboratorio se corrobora que existen tres etapas principales en los procesos de desecación (Bronswijk, 1988). La primera es de retracción con el suelo saturado, etapa que se puede estudiar con la Mecánica de Suelos Saturados, pero que no permite evaluar los cambios en succión producidos. La segunda etapa, de contracción no saturada, es descrita de forma consistente con la formulación basada en la Mecánica de Suelos no Saturados como se demuestra en esta Tesis Doctoral. Finalmente, la tercera etapa de desecación sin prácticamente contracción también es capturada de forma aceptable por la presente formulación.

6.3. Conclusiones Respecto de las Simulaciones Realizadas.

El aporte numérico más importante de esta Tesis es la implementación de una herramienta específica para el análisis de los problemas de desecación en suelos arcillosos. Se presenta el código y se demuestran sus capacidades simulando varios casos de desecación tanto hipotéticos como reales vinculados a la experiencia en el laboratorio. En definitiva, se presenta una herramienta versátil para analizar distintos casos sobre todo de condiciones de contorno. La posibilidad de análisis de grietas sencillas ayuda a comprender el proceso y reproducir ensayos de laboratorio.

Respecto de la desecación con restricciones mínimas, la simulación numérica (*sobre una muestra ideal: cilíndrica: 40 cm de diámetro de longitud infinita, sin peso propio, con succión aplicada en el contorno y en condición de deformación plana*), de la desecación con restricciones mínimas, solo produce desarrollo de tensiones de compresión en la matriz de suelo. La simulación demuestra que los gradientes de succión producen un incremento en las tensiones de la matriz de suelo y que estas tensiones son de compresión mientras no se produzcan restricciones que induzcan al desarrollo de tensiones de tracción.

Respecto del efecto de las condiciones de contorno, se estudia cómo afectan al proceso de desecación, utilizando la herramienta propuesta. Se estudia el funcionamiento del modelo a la vez que se ha analizado lo que sucede en el laboratorio durante el proceso de secado bajo

distintas condiciones, materializadas por distintos esquemas de condiciones de contorno en succión y desplazamientos, sobre secciones radiales de muestras cilíndricas.

Se observa que hay condiciones de contorno que no favorecen a la aparición de tensiones de tracción y por lo tanto no se producirán grietas. Para que haya tracción es necesario restringir los desplazamientos en las direcciones de los gradientes de succión.

Se observa que existen efectos de segundo orden cuando las deformaciones son grandes. Esto es, la deformación de la muestra distorsiona los perfiles de succión en la matriz de suelo, induciendo gradientes en dos direcciones, cuando la condición de contorno original solo produce gradientes en una dirección.

El modelo permite establecer el grado de importancia que tienen las condiciones de contorno cuando se estudian problemas de desecación en muestras circulares de los tamaños que rondan los *80-40 cm de diámetro y 20-10 cm de altura*.

El agrietamiento produce unas condiciones de contorno en succión complejas que junto a la deformación de la muestra generan cambios en la dirección de las direcciones principales de tensión. Esto implica la necesidad de un análisis en tensiones principales cuando las deformaciones sean importantes y cuando la condición de contorno en succión sea compleja.

Respecto del efecto de las grietas, se presenta un estudio de la influencia de una grieta central de *1, 5, 10, 15 y 19 cm de profundidad*, sobre una sección diametral (*40 cm x 20 cm*). Se comprueba la modificación del comportamiento cuando está presente una grieta y su influencia según su profundidad, concluyendo que las grietas al producirse, reducen el efecto de arqueo.

Se ha analizado la influencia de las grietas laterales en el comportamiento general de la muestra (*Sección radial 20 cm x 10 cm*). Se ha conseguido reproducir y explicar el comportamiento observado en el laboratorio de flexión de la muestra (arqueo cóncavo). Se han establecido las condiciones de contorno y comportamiento hidromecánico que explican por qué ocurre el arqueo.

Es evidente que la formación de grietas en la geometría de la muestra de suelo modifica las condiciones de contorno del problema, liberando coacciones y exponiendo al ambiente nuevos contornos. El modelo predice que estos cambios producirán efectos importantes en el comportamiento hidromecánico de la sección estudiada en cuanto a la desecación y a la retracción del suelo. Se generan variaciones en la evolución de las variables hidromecánicas del problema que a su vez modifican el estado de tensiones, los cuales son responsables de alcanzar las condiciones necesarias para el desarrollo de nuevas grietas.

Respecto del arqueo en muestras de pequeño espesor, se simula el arqueo en muestras delgadas ($25\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 1.25\text{ cm}$) explicando los mecanismos de la contracción isotrópica, arqueo cóncavo y convexo. Se observa que la interacción entre evolución del campo de succión, rigidez de la muestra, resistencia a tracción, etc. definen un comportamiento contra intuitivo de la matriz de suelo, como por ejemplo en el caso del fenómeno de arqueo. En un principio, se puede pensar que la desecación produce mayor contracción en la superficie superior de las muestras que están expuestas directamente al ambiente. Luego de los análisis se concluye que si bien la superficie superior está expuesta al ambiente, también es cierto que su rigidez aumenta más rápido con lo cual finalmente, las zonas inferiores de las muestras tienden a deformarse más.

Respecto de la simulación de desecación en muestras de 40 cm de diámetro x 10 cm de altura, se comprueba la influencia de la temperatura en la velocidad de secado y en el proceso mecánico de secado. La evaporación acelerada por efecto de la temperatura y humedad relativa del ambiente de la CA producen cambios en las propiedades del suelo que modifican su respuesta ante el proceso de desecación. Se simula el ensayo de secado rápido encontrando los esquemas adecuados para reproducir las tensiones de tracción que justifican las grietas del contorno y la grieta central. Se observa, que la condición de contorno de succión no uniforme en el borde superior de la sección en estudio, produce un estado de tensiones que favorecen el agrietamiento desde el centro de la muestra.

Respecto de la simulación de la desecación en muestras de 80 cm de diámetro x 10 cm de altura, se estudia la posibilidad de aplicar la condición de contorno de succión de manera gradual y así ajustar mejor la evolución de las variables fundamentales del modelo. Se captura el comportamiento de la succión a lo largo del tiempo obtenido en el laboratorio.

Se reproducen bien las tres etapas principales estudiadas en el laboratorio: retracción en condición cercana a la saturación, retracción no saturada y pequeña deformación en condición no saturada al final de los ensayos.

Respecto de la simulación de la desecación en muestras de gran tamaño, se tiene en cuenta que la resistencia del suelo es función del grado de saturación y por lo tanto de la succión. Se simula el proceso de agrietamiento que se inicia en la superficie al alcanzar la resistencia a tracción del suelo y que se propaga hacia el fondo de la muestra debido a que se alcanzan repetidamente las condiciones de propagación por la presencia de tensiones de tracción mayores a la resistencia del suelo.

Se demuestra así, que un modelo determinista puede simular el proceso de retracción y agrietamiento prediciendo el lugar donde se iniciarán y como propagarán las grietas. Se demuestra además, que es posible trabajar con el código para analizar ensayos de desecación en suelos incluyendo el fenómeno de iniciación y propagación de una grieta.

6.4. Futuras Líneas de Investigación en la Vertiente Experimental

En esta Tesis Doctoral se demuestra que la resistencia a tracción del suelo permite establecer un criterio válido y plausible de ser implementado en un código numérico. Esta propiedad del suelo está en función de la succión, grado de saturación, contenido de agua, etc. y por lo tanto es necesario investigar estas relaciones en el laboratorio.

Una vez iniciada la grieta es necesario el uso de los parámetros de la Mecánica de Fractura que dependen de la succión. Por este motivo, los ensayos que se suelen hacer no son adecuados, o bien la manipulación de las muestras se complica cuando el valor de humedad es alto. Por lo tanto, es necesario desarrollar mayor investigación experimental en la determinación de los parámetros de fractura.

Es necesario ahondar en el estudio de la influencia de las condiciones de contorno y buscar mayor control en los patrones de agrietamiento para dilucidar los mecanismos que producen el agrietamiento. Desde un punto de vista ingenieril, conocer estos comportamientos permite tener cierto control en los procesos de agrietamiento, pudiendo predecir de forma aproximada como se producirán algunas de las grietas por desecación.

Los ensayos de ciclos sucesivos de secado y humedecimiento son importantes para determinar si el comportamiento durante la desecación es reversible. Si lo es, es necesario determinar cuáles son las condiciones para las cuales presenta reversibilidad y hasta qué punto es irreversible.

Es necesario seguir innovando, mejorando y ajustando la CA y los equipos que permiten la instrumentación de los ensayos. Para estudiar mejor el efecto de humedecimiento e inundación habría que realizar ensayos más largos con altos contenidos de humedad ambiente ya que el proceso de humedecimiento del suelo mediante aporte de la humedad exterior es muy lento y requiere, quizás, de varios meses.

El ensayo de secado rápido ha demostrado que la temperatura tiene un efecto importante en el proceso. Si bien es cierto que el control de temperatura complica los ensayos, es evidente que existe la necesidad de su estudio.

Es necesario repetir los ensayos para realizar un análisis de la variabilidad de los resultados obtenidos. Cuestiones fundamentales como el lugar y el tiempo de inicio de la primera grieta no están claros aún y dependen del tamaño de la muestra, la adherencia y rugosidad de la bandeja contenedora, contenido de agua inicial, tamaño máximo de partículas, condiciones de contorno, etc.

Es evidente la necesidad de ir a ensayos de gran escala para continuar la investigación en este campo. El proceso se da comúnmente en la naturaleza y es necesario tener en cuenta otras variables que no se pueden reproducir en el laboratorio, al menos con relativa facilidad. Las variaciones de las variables medioambientales (radiación solar, vientos, etc.) influyen sobre los procesos y estos aún no han sido cualitativamente estudiados. Parece claro que el siguiente paso en complejidad desde la vertiente experimental es el aumento de la escala de los ensayos.

Desde un punto de vista metodológico es necesario:

Repetir los experimentos realizados en el pasado y en otros centros utilizando la arcilla de Barcelona, pues esto creará la posibilidad de hacer comparaciones válidas asumiendo las mismas condiciones de ensayos anteriores y comparar el efecto de las propiedades del suelo de Barcelona y del suelo original utilizado en esos trabajos.

Adaptar los ensayos para explotar mejor la herramienta numérica, forzando las condiciones de contorno en desplazamiento para acercarlas a la idealización del modelo (*por ejemplo: eliminar la adherencia con la bandeja usando materiales antiadherentes como el teflón*). Así, se pueden obtener mejores resultados y simulaciones más sencillas de calibrar. Se ha visto que las bandejas cilíndricas con fondo liso, solo presentan unas pocas grietas que se propaguen siempre en dirección vertical y un mínimo de grietas capilares o pequeñas que apenas propagan.

El fenómeno de arqueo puede ayudar a definir ensayos sin restricciones que sirven para calibrar el modelo hidromecánico, evitando la complicación que genera el agrietamiento.

Las condiciones de contorno, el tamaño y la forma de las muestras de suelo tienen una influencia importante en el comportamiento del suelo bajo desecación, es necesario por tanto explorar las razones de estas diferencias. Deberían investigarse además de las formas rectangulares y circulares, otras formas que permitan corroborar y descubrir todas las variables involucradas en el proceso, formas en L o T han mostrado ser útiles (Ávila, 2004).

Se ha visto que las lecturas de laboratorio respecto de la succión presentan gran cantidad de ruido que hay que filtrar (oscilaciones en las lecturas). Es necesario por tanto estudiar la manera de reducir estas oscilaciones para tener mayor certeza en los resultados de las mediciones.

Desde un Punto de vista práctico es necesario:

Elaboración de una metodología para la predicción y evaluación de los riesgos potenciales debidos a las condiciones de fisuración en suelos (alteración de la permeabilidad, transporte de contaminantes, etc.).

Desarrollo de la metodología para la cuantificación de los distintos parámetros que caracterizan la red de fisuras tridimensional. Validación de la metodología mediante doble comprobación de las medidas efectuadas y desmantelamiento de los ensayos.

Continuar con la caracterización del suelo desde la óptica de la mecánica de fractura, y el uso de la misma para describir los fenómenos de agrietamiento por desecación.

Encontrar evidencia experimental respecto de la influencia del tipo de suelo respecto del comportamiento en desecación. Esta evidencia debe obtenerse de manera sistemática haciendo comparaciones entre distintos tipos de suelo.

6.5. Futuras Líneas de Investigación en la Vertiente Teórica

Actualmente, es evidente la influencia que tienen las condiciones de contorno en el problema de la desecación en suelos. Las condiciones de contorno vienen impuestas por un lado por el ambiente que rodea al suelo y por otro por los contenedores del suelo en el caso de ensayos de laboratorio. La interacción existente entre el ambiente y los contenedores necesitan un estudio de interacción. El ambiente está en contacto con el suelo y es necesario comprender lo que sucede en la interface. De la misma forma la adherencia manifiesta entre contenedores y suelo es compleja, cambiante e influye notablemente en el resultado final. De esta forma es necesario su estudio.

En muchos ensayos, se han visto grietas que no pueden explicarse sencillamente por las tensiones de tracción derivadas de las restricciones a la retracción producida por la desecación de la muestra. Es necesario establecer qué otros mecanismos producen agrietamiento en el suelo, si es que los hay. Se hace necesario estudiar cómo afectan a los procesos de sinéresis y coalescencia, que son fenómenos de contracción puntuales, que también producen tensiones y agrietamiento.

Gran parte del proceso se produce en condición saturada. Por esta razón sería interesante poder estudiar el proceso saturado y su transición y desarrollo en condición no saturada.

Existen problemas de teóricos de fondo no resueltos todavía, como la transición del problema saturado al no saturado, la unificación de las variables de estado, la unificación de teorías de rotura con teorías de propagación de fisuras, etc. que una vez resueltos mejorarán el enfoque del problema.

La naturaleza aleatoria de ciertas variables del problema, hace necesario el uso de herramientas estadísticas para estudiar su comportamiento y poder definir rangos de variación aceptables.

Introducir un estudio probabilístico en las variables que tengan una mayor carga aleatoria como ser la distribución de resistencia a tracción, el frente de saturación (el cual condiciona el perfil de succión), etc. Debido a la gran complejidad del problema se observa que hay una gran incertidumbre. Esto junto a la adquisición de una gran cantidad de datos hace que sea necesario plantearse la posibilidad de estudios estadísticos y de inferencia para estudiar el problema.

6.6. Futuras Líneas de Investigación en la Vertiente Numérica

En base a los resultados obtenidos en la tesis, sería interesante poder mejorar la discretización de la malla de elementos finitos en la proximidad de la punta de la grieta para mejorar la exactitud del cálculo de las tensiones en esa zona. Para ello podemos investigar un algoritmo sencillo de remallado adaptable. En las puntas de las grietas hay que refinar la malla para calcular con la mayor precisión posible los parámetros de fractura.

La tecnología de los elementos utilizados puede ser mejorada en cuanto a las capacidades del elemento para los cálculos relacionados con la fractura.

Desarrollo de un código numérico tridimensional basado en el método de los elementos finitos que combine la formulación acoplada hidromecánica en condiciones no saturadas, para definir la iniciación de la grieta, y una formulación basada en la Mecánica de Fractura para decidir la propagación, incluyendo técnicas de remallado automático para poder reproducir la evolución de las grietas. La necesidad de ir a 3D para poder reproducir de manera realista lo que sucede durante el proceso se justifica por el hecho de que la primera grieta, una vez propagada, dificulta el estudio en dos dimensiones debido a la pérdida de simetrías.

Existe una limitación respecto de tratar el problema como un continuo. Las porciones de suelo en desecación no pueden ser independientes unas de otras (postulado de continuidad). Para cumplirlo se puede pensar en modelos embebidos como el XFEM.

Implementación de un algoritmo que combine un criterio de rotura con los criterios de propagación de la Mecánica de fractura para predecir la dirección de propagación y la longitud de propagación de la grieta.

Añadir heterogeneidad al modelo para poder predecir el efecto del volcado de la muestra de suelo en la bandeja, el cual produce junto al enrasado condiciones que pueden favorecer al agrietamiento.

Modelado más sofisticado del contorno. En primer lugar existe el problema de adherencia con los moldes. En segundo lugar el comportamiento de las grietas. Si se usaran elementos junta en el contorno deberían ser elementos sin espesor e hidromecánicos para poder simular la pérdida de humedad a través de las grietas formadas.

Es evidente la necesidad de simulación de ensayos de resistencia a tracción y de energía de fractura. Simulación de ensayos donde la succión solo evolucione a valores de la máxima capacidad de los tensiómetros para reproducir el comportamiento del suelo con precisión y poder calibrar el modelo.

A largo plazo, se debería estar en condiciones de establecer recomendaciones para limitar el efecto de las oscilaciones medioambientales en el agrietamiento de suelos utilizados en instalaciones sensibles, como el caso de vertederos, balsas de riego o de residuos, plataformas de apoyo de carreteras, etc.

Bibliografía

- [1] Anandarajah, A. **Computational Methods in Elasticity and Plasticity: Solids and Porous Media**. Springer; 2010 edition (1 Sep 2010). ISBN-13: 978-1441963789
- [2] Arana, J y Gonzales, J.J. **Mecánica de Fractura**. Servicio Editorial UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO. ISBN 84-8373-455-9
- [3] Atkinson, Barry Kean (Editor). **Fracture Mechanics of Rock** (Academic Press Geology Series). ISBN-10: 0120662663 | ISBN-13: 978-0120662661.
- [4] Chen, W. F. and Mizuno, E. **Nonlinear analysis in soil mechanics**. Theory and implementation –Elsevier. 1990. ISBN-10: 0444430431 | ISBN-13: 978-0444430434
- [5] Fredlund, D.G and Rahardjo, H. **Soils mechanics for unsaturated soils**. WILEY INTER-SCIENCE. © 1993. ISBN-10: 047185008X | ISBN-13: 978-0471850083
- [6] González, J.L. **Mecánica de Fractura**. Ediciones Limusa. ©2004. ISBN-10: 681861302 | ISBN-13: 978-9681861308
- [7] Kuna, Meinhard. **Finite Elements in Fracture Mechanics: Theory - Numerics - Applications (Solid Mechanics and Its Applications)**. Springer; 2013 edition (30 July 2013). ISBN-13: 978-9400766792
- [8] Lambe, T.W. **Mecánica de Suelos (Spanish Edition)**. Ediciones Limusa. ©2008. ISBN-10: 9681818946 | ISBN-13: 978-9681818944
- [9] Lewis, R.W and Schrefler, B.A. **The finite element method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation in Porous Media**. WILEY(Second edition). ©1998. ISBN-10: 0471928097 | ISBN-13: 978-0471928096
- [10] López Cela, J.J. **Mecánica de los Medios Continuos**. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. ©1999. ISBN 84-8427-030-0
- [11] Oliver, X. y Agelet, C. **Mecánica de Medios Continuos para Ingenieros**. Ediciones UPC. 2002. ISBN 84-8301-582-X
- [12] Oñate, E. **Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos**. Ediciones CIMNE. ©1995. ISBN: 84-87867-00-6
- [13] Pérez, Cesar. **Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería**. Pearson Education. ©2002. ISBN-10: 8420535370 | ISBN-13: 978-8420535371
- [14] Spencer, A.J.M. **Continuum Mechanics**. Dover. ©1980. ISBN 0-486-43594-6
- [15] Szymkiewicz, Adam. **Modelling Water Flow in Unsaturated Porous Media: Accounting for Nonlinear Permeability and Material Heterogeneity**. Springer; 2012 edition (11 Oct 2012). ISBN-13: 978-3642235580
- [16] Zienkiewicz, O. C. and Morgan, K. **Finite Elements and Approximation**. Dover. ©1983. ISBN 0-486-45301-4
- [17] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. **The Finite Element Method. Solid Mechanics**. BUTTERWORTH-HEINEMANN (Fifth edition). ©2000. ISBN-10: 0750650494 | ISBN-13: 978-0750650496
- [18] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L. **The Finite Element Method. The Basis**. BUTTERWORTH-HEINEMANN (Fifth edition). ©2000. ISBN-10: 0750650559 | ISBN-13: 978-0750650557

Referencias

Capítulo 1 Introducción

Abu-Hejleh, A. & Znidarcic, D., 1995. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 121(6), pp. 493-502.

Aoki, K., Hai Dong, N., Kaneko, T. & Kuriyama, S., 2002. *Physically based simulation of cracks on drying 3D solid*. Beijing, s.n.

Ávila, G., 2004. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *PhD Thesis*, p. 283.

Bronswijk, J., 1991. Relation between vertical soil movements and water content changes in cracking clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55(5), pp. 1220-1226.

Casagrande, A., 1948. Classification and identification of soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Volume 113, p. 901.

Corte, A. & Higashi, A., 1960. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soils. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment*, Volume 66.

Federl, P., 2002. *Modeling Fracture Formation on Growing Surfaces*. Calgary, Alberta: s.n.

Griffith, A. A., 1924. *The theory of rupture*. Delft, Netherlands, s.n., pp. 55-63.

Haines, W., 1923. The volume change associated with variations of water content in soils. *J. Agri. Sci.*, 13(part 3), pp. 296-310.

Iben, H. N. & O'brien, J. F., 2006. *Generating Surface Crack Patterns*. s.l., s.n.

Juarez Badillo, E. & Rico Rodríguez, A., 1969. Apéndice I. Mecánica de Suelos. Teoría de grietas por tensión.. In: M. Limusa, ed. s.l.:s.n., pp. 329-346.

Justo, J. L., Vázquez, N. J. & Justo, E., 2002. *Subsidence in saturated-unsaturated soils: application to Murcia (Spain)*. Recife, Brazil, s.n., pp. 845-850.

- Khalili, K., Bagherian, M. & Khisheh, S., 2014. *Numerical simulation of drying ceramic using FEM and machine vision*. Mures, Romania, s.n.
- Kindle, E. M., 1917. Some factors affecting the development of mud-cracks. *Journal of Geology*, Volume 25, pp. 135-144.
- Kodikara, J., Nahlawi, H. & Bouazza, A., 2004. Modeling of curling in desiccating clay. *Canadian Geotechnical J.*, 41(3), pp. 560-566.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997a. Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 929-942.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997b. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 477-488.
- Lakshmikantha, M., 2009. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *PhD Thesis*.
- Lau, J., 1987. Desiccation cracking of clay soils. *MSc Thesis*.
- Leonard, R. J., 1929. An earth fissure in southern Arizona. *Journal of Geology*, 37(8), pp. 765-774.
- Longwell, C., 1928. Three common types of desert mud cracks. *American Journal of Science, 5th series*, Volume XV, pp. 136-145.
- Morris, P., Graham, J. & Williams, D., 1992. Cracking in Drying Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 29(2), pp. 263-277.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E. E., 1996. Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media. *Engineering computations*, 13(7), pp. 87-112.
- Pham, Q. T. & Willix, J., 1984. A Model for Food Desiccation in Frozen Storage. *Journal of food science*, 49(5), pp. 1275-1281.
- Prat, P., Ledesma, A. & Cabeza, L., 2002. Drying and Cracking of soils: Numerical Modelling.. *8th Int. Conference on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VIII*, pp. 705-711.
- Rodríguez, R., 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (CUBA): Influencia del comportamiento hidromecánico. *Technical University of Catalonia*, p. 460.
- Rodríguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 44(6), pp. 644-658.
- Schumann, H. H. & Poland, J. F., 1969. *Land subsidence, earth fissures and groundwater withdrawal in south-central Arizona, USA*. s.l., s.n., pp. 295-302.
-

Skempton, A. & Northey, R., 1952. The sensitivity of clays. *Geotechnique*, 3(1), pp. 100-106.

Tang, C. et al., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engng Geology*, 101(3-4), pp. 204-217.

Vallejo, L. E., 1994. *Application of Fracture Mechanics to Soils: an Overview*. s.l., ASCE.

Capítulo 2 Estado del Arte

Abu-Hejleh, A. & Znidarcic, D., 1995. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 121(6), pp. 493-502.

Abu-Hejleh, A. & Znidarcic, D., 1995. Desiccation theory for soft cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 121(6), pp. 493-502.

Amarasiri, A. & Kodikara, J., 2013. Numerical modeling of desiccation cracking using the cohesive crack method. *Internationa journal of geomechanics*, Volume 13, pp. 213-221.

Amarasiri, A. L., Kodikara, J. K. & Costa, S., 2011. Numerical modelling of desiccation cracking. *Internationa Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 35, pp. 82-96.

Aruna, A. & Kodikara, J., 2011. Numerial modelling of desiccation cracking. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 35, pp. 82-96.

Ávila, G., 2004. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *PhD Thesis*, p. 283.

Ávila, G., Ledesma, A. & Lloret, A., 2002. Measurement of fracture mechanics parameters for the analysis of cracking in clayey soils. *Procedings 3rd Int. Conf. Unsat. Soils.*, Volume 2, pp. 547-552.

Ayad, R., Konrad, J. & Soulié, M., 1997. Desiccation of a sensitive clay: application of the model CRACK. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 943-951.

Bagge, G., 1985. Tension cracks in saturated clay cuttings. *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Volume 2, pp. 393-395.

Baker, R., 1981. Tensile Strength, tension cracks, and stability of slopes.. *Soils and Foundations*, Volume 21, pp. 1-17.

Barbour, S., 1986. *Osmotic flow and volume change in clay soils*. Saskatoon, Saskatchewan, Canada: University of Saskatoon.

- Brenner, R., Nutalaya, P., Chilingarian, G. & Robertson, J., 1981. Engineering geology of soft clays. In: *Soft Clay Engineering*. s.l.:E.W. Brand and R.P. Brenner, Elsevier Scientific Publishing Co., pp. 159-231.
- Bronswijk, J. J., 1988. Modelling of water balance, cracking and subsidence in clay soils. *Journal of Hydrology*, 97(3-4), pp. 199-212.
- Burst, J., 1965. Subaqueously formed shrinkage cracks in clay. *Journal of Sedimentary Petrology*, 35(2), pp. 348-353.
- Chan, D., Kodikara, J., Ranjith, P. & Choi, X., 2007. *Data analysis and laboratory investigation of the behaviour of pipes buried in reactive clay*. Brisbane, s.n., pp. 206-211.
- Corte, A. & Higashi, A., 1960. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soils. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment*, Volume 66.
- Costa, S., Kodikara, J. & Shannon, B., 2013. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments. *Geotechnique*, Volume 63(1), pp. 18-29.
- Costa, S., Kodikara, J. & Shannon, B., n.d. Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments. *Geotechnique*, Volume 63(1), pp. 18-29.
- Erdogan, F. & Sih, G. C., 1963. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), pp. 519-527.
- Fang, H. Y., 1997. Introduction to Environmental Geotechnology. *New Directions in Civil Engineering*, Volume 14.
- Farrel, D., Greacen, E. & Larson, W., 1967. The effect of water content on axial strain in a loam soil under tension and compression. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Volume 31, pp. 445-450.
- Fleureau, J., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R. & Taibi, S., 1993. Behavior of clayey soil on drying-wetting paths. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(2), pp. 287-296.
- Fredlund, D., 1979. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 16, pp. 121-139.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for unsaturated soils*. New York: John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. & Morgenstern, N., 1976. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(3), pp. 261-276.
- Fredlund, D. & Morgenstern, N., 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Geotechnical Engineering Div. ASCE*, Volume 103, pp. 447-466.

Frood, D., 1992. Vegetation of the native grasslands in the Merri Creek Valley, outer Melbourne area. *Ecological survey report*, Volume 42.

Fuyiyasu, Y., Fahey, M. & Newson, T., 2000. Field investigation of evaporation from freshwater tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6), pp. 556-567.

Gokhale, K. & Anandakrishnan, M., 1970. Role of active clay in the shrinkage behavior in multi-component clay sand systems. *Soil and Foundation*, 10(3), pp. 92-94.

Griffith, A. A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Volume 221, pp. 163-198.

Griffith, A. A., 1924. *The theory of rupture*. Delft, Netherlands, s.n., pp. 55-63.

Haines, W., 1923. The volume change associated with variations of water content in soils. *J. Agri. Sci.*, 13(part 3), pp. 296-310.

Hamilton, A., 1966. Freezing shrinkage in compacted clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 3(1), pp. 1-17.

Harrison, J. & Hardin, B., 1994. Cracking in Clays. Solutions to problems in earth structures. *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 187, pp. 467-484.

Hartranft & Sih, 1973. *Handbook of stress-intensity factors. Stress-intensity factor solutions and formulas for reference*. Bethlehem, Penn: G.C. Sih Institute of Fracture and Solid Mechanics. Lehigh University..

Inci, G., 2008. *Numerical modeling of desiccation cracking in compacted soils*. Goa, India, s.n., pp. 1116-1125.

Ingraffea, A. R., 1978. *On discrete fracture propagation in rock loaded in compression*. Swansea, UK, s.n., pp. 235-248.

Irwin, G., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, Volume 24, pp. 361-364.

Irwin, G., 1958. Fracture, *Handbuch der Physik*. Volume VI, pp. 361-364.

Itasca, 2003. *PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) versio 3.0*. Mineapolis, s.n.

Jahn, A., 1950. Osoblúve formy poligonálne natakachw dolonie wieprza. *Acta Geologica Polonica*, 1(2), pp. 150-157.

Kindle, E. M., 1917. Some factors affecting the development of mud-cracks. *Journal of Geology*, Volume 25, pp. 135-144.

- Kleppe, J. & Olson, R., 1985. Desiccation cracking of soil barriers. *ASTM Spec. Techn. Publ.*, Volume 874.
- Knechtel, M., 1952. Pimpled plains of eastern Oklahoma. *Bull. Geol. Soc. of America*, Volume 63, pp. 689-700.
- Kodikara, J., Barbour, S. & Fredlund, D., 1999. *Changes in clay structure and behaviour due to wetting and drying*. Hobart, Tasmania, N. Vitharana. Institution of Engineers, Australia, pp. 179-185.
- Kodikara, J., Barbour, S. & Fredlund, D., 2000. Desiccation cracking of soils layers. *UNSAT ASIA 2000*.
- Kodikara, J. & Choi, X., 2006. *A simplified analytical model for desiccation cracking of clay layers in laboratory tests*. Carefree, Arizona, ASCE Geotechnical Special Publications 147, pp. 2558-2569.
- Kodikara, J., Nahlawi, H. & Bouazza, A., 2004. Modeling of curling in desiccating clay. *Canadian Geotechnical J.*, 41(3), pp. 560-566.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997a. Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 929-942.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997b. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 477-488.
- Lachenbruch, A., 1962. Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. *Geological survey of America special paper*, Volume 70.
- Lachenbruch, A. H., 1961. Depth and spacing of tension cracks. *Journal of Geophysical Research*, 66(12), pp. 4273-4292.
- Lakshmikantha, M., 2009. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *PhD Thesis*.
- Lakshmikantha, M., Prat, P. & Ledesma, A., 2006. *An experimental study of cracking mechanisms in drying soils*. London, s.n., pp. 533-540.
- Lakshmikantha, M. R., Prat, P. C. & Ledesma, A., 2009. Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil. *Geotechnical Testing Journal*, 36(6), pp. 505-515.
- Lambe, T., 1958. The structure of compacted clay. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 84(SM2), pp. 1654-1 to 1654-34.
- Lau, J., 1987. Desiccation cracking of clay soils. *MSc Thesis*.
- Lee, F. & K.W. Lo, S. L., 1988. Tension Crack Development in Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 114(8), pp. 915-929.

- Lee, I. & Ingles, O., 1968. Strength and deformation of soil and rocks. *Soils Mechanics, selected topics*, Volume Chapter 4, pp. 195-294.
- Levatti, H., Prat, P. & Ledesma, A., 2009a. *Numerical modelling of desiccation processes in clayey soils*. Juan-les-Pins, Cote d'Azur, France, s.n., pp. 630-639.
- Levatti, H., Prat, P. & Ledesma, A., 2009b. *Influence of cracking in the desiccation process of clay soils*. s.l., s.n., pp. 687-690.
- Levatti, H., Prat, P. & Ledesma, A., 2009. *Influence of cracking in the desiccation process of clay soils*. s.l., s.n., pp. 687-690.
- Levatti, H. U., 2012. *Simulación numérica de procesos de desecación en suelos cohesivos de baja plasticidad. Tesina de Especialidad..* Barcelona(Barcelona): UPCCOMMONS.
- Lloret, A. & Alonso, E., 1985. *State surfaces for partially saturated soils*. San Francisco, California, Publications Committee of XI ICSMFE. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 557-562.
- Lloret, A. et al., 1998. *Crack initiation in drying soils*. Beijing, China, International Academic Publisher, Beijing, China, pp. 497-502.
- Longwell, C., 1928. Three common types of desert mud cracks. *American Journal of Science, 5th series*, Volume XV, pp. 136-145.
- Matyas, E. & Radhakrishna, H., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, Volume 18, pp. 432-448.
- Mitchel, J., 1976. *Fundamentals of soil behaviour*. New York: John Wiler & Sons.
- Morris, P., Graham, J. & Williams, D., 1992. Cracking in Drying Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 29(2), pp. 263-277.
- Morris, P., Graham, J. & Williams, D., 1994. Crack depths in drying clays using fracture mechanics. *Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering*, pp. 40-53.
- Muller, G., 1998. Experimental simulation of basalt columns. *J. Volcanol. Geothermal Res.*, 86(1), pp. 93-96.
- Nahlawi, H., 2004. *Behaviour of a reactive soil during desiccation*, Clayton, Australia: .
- Nahlawi, H., Chakrabarti, S. & Kodikara, J., 2004. A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials. *Geotechnical Testing J.*, 27(4), pp. 1-6.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2002. *Experimental observations on curling of desiccating clay*. Recife, Brasil, s.n., pp. 553-556.
-

- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volume 24, pp. 1641-1664.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E. E., 1996. Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media. *Engineering computations*, 13(7), pp. 87-112.
- Orowan, E., 1948. Fracture and Strength of Solids. *Reports on Progress in Physics XII*, pp. 185-232.
- Peron, H., Delenne, J., Laloui, L. & Yousoufi, M., 2009. Discrete element modelling of drying shrinkage and cracking of soils. *Computers and Geotechnics*, Volume 36, pp. 61-69.
- Peron, H., Hueckel, T. & Laloui, L., 2007. An improved volume measurement for determining soil water retention curves. *Geotechnical Testing Journal*, Volume 30(1), pp. 1-8.
- Peron, H., Hueckel, T., Laloui, L. & Hu, L., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 46, pp. 1177-1201.
- Prat, P., Ledesma, A. & Cabeza, L., 2002. Drying and Cracking of soils: Numerical Modelling.. *8th Int. Conference on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VIII*, pp. 705-711.
- Prat, P., Ledesma, A., Cuadrado, A. & Levatti, H., 2013. *Ground penetrating radar system for detection of desiccation cracks in soils*. s.l., s.n.
- Ritchie, J. & Adams, J., 1974. Field measurement of evaporation from soil shrinkage cracks. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38(1), pp. 131-134.
- Rodríguez, R., 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (CUBA): Influencia del comportamiento hidromecánico. *Technical University of Catalonia*, p. 460.
- Rodríguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 44(6), pp. 644-658.
- Sadda, A., Bianchini, G. & Liang, L., 1994. Cracks, bifurcation and shear bands propagations in saturated clays. *Geotechnique*, Volume 44, pp. 35-64.
- Serra, J., 1982. Image analysis and mathematical morphology.
- Shin, H. & Santamarina, J., 2011. Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis. *Geotechnique*, Volume 61, pp. 961-972.
- Sima, J., Jiang, M. & Zhou, C., 2013. *Modeling desiccation cracking in thin clay layer using three-dimensional discrete element method*. s.l., s.n., pp. 245-248.

- Simpson, W., 1936. Foundation experience with clay in Texas. *Civil Engineering*, Volume 4, pp. 581-584.
- Skempton, A. & Northey, R., 1952. The sensitivity of clays. *Geotechnique*, 3(1), pp. 100-106.
- Snyder, V. & Miller, R., 1985. Tensile strength of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, Volume 49, pp. 58-65.
- Sridharan, A. & Rao, G., 1971. Effective stress theory of shrinkage phenomena. *Canadian Geotechnical Journal*, 8(4), pp. 505-513.
- Tang C.S., S. B. L. C. S. W. G. L., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science*, 52(1).
- Tang, C. et al., 2011. Experimental investigation of the desiccation cracking behavior of soil layers during drying. *Journal of materials in civil engineering*, Volume 23, pp. 873-878.
- Tang, C. et al., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, Volume 101, pp. 204-210.
- Tang, G. & Graham, J., 2000. A method for testing tensile strength in unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal*, Volume 23(3), pp. 377-382.
- Toramaru, A. & Matsumoto, T., 2004. Columnar joint morphology and cooling rate: a starch-water mixture experiment. *J. Geophys. Res.*, Volume 109.
- Towner, G., 1987a. The tensile stress generated in clay through drying. *J. Agric. Engng. Res.*, Volume 37, pp. 279-289.
- Towner, G., 1987b. The Mechanics of Cracking of Drying Clay. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 36, pp. 115-124.
- Towner, G., 1987. The Mechanics of Cracking of Drying Clay. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Volume 36, pp. 115-124.
- Trabelsi, H., Jamei, M., Zenzri, H. & Olivella, S., 2012. Crack patterns in clayey soils: Experiments and modeling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 36, pp. 1410-1433.
- Twenhofel, W., 1950. Principles of sedimentation. In: New York: McGraw-Hill, pp. 588-593.
- VanGenuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), pp. 892-898.
- Vogel, H., Hofmann, H. & Roth, K., 2005. Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results and morphological quantification. *Geoderma*, Volume 125, pp. 203-211.

Washburn, A. L., 1956. Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Bulletin of the Geological Society of America*, Volume 67, pp. 823-866.

Weinberger, R., 1999. Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments. *Journal of Structural Geology*, Volume 21, pp. 379-386.

White, W., 1961. Colloid phenomena in sedimentation of argillaceous rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, Volume 31, pp. 560-570.

Willden, R. & Mabey, D., 1961. Giant desiccation fissures on the black rock and smoke creek deserts, Nevada. *Science*, 133(3461), pp. 1359-1360.

Yesiller, N., Miller, C., Inci, G. & Yaldo, K., 2000. Desiccation and cracking behaviour of three compacted landfill liner soils. *Engineering Geology*, Volume 57, pp. 105-121.

Capítulo 3 Análisis Experimental

Ávila, G., 2004. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *PhD Thesis*, p. 283.

Barrera, M., 2002. Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables. En: *Tesis Doctoral*. Barcelona: UPC.

Corte, A. & Higashi, A., 1960. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soils. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment*, Volumen 66.

Knoll, M. D. & Knight, R., 1994. *Relationships between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures*. s.l., Waterloo Centre for Groundwater Research, pp. 45-61.

Lakshmikantha, M., 2009. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *PhD Thesis*.

Lakshmikantha, M., Prat, P. & Ledesma, A., 2006. *An experimental study of cracking mechanisms in drying soils*. London, s.n., pp. 533-540.

Lakshmikantha, M. R., Prat, P. C. & Ledesma, A., 2009. Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil. *Geotechnical Testing Journal*, 36(6), pp. 505-515.

Lau, J., 1987. Desiccation cracking of clay soils. *MSc Thesis*.

Lloret, A. y otros, 1998. *Crack initiation in drying soils*. Beijing, China, International Academic Publisher, Beijing, China, pp. 497-502.

- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2002. *Experimental observations on curling of desiccating clay*. Recife, Brasil, s.n., pp. 553-556.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volumen 24, pp. 1641-1664.
- Peplinsky, N. R., Ulaby, F. T. & Dobson, M. C., 1995. Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3 GHz Range. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3).
- Pérez, V., 2001. *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. PhD Thesis..* Barcelona: UPC-BarcelonaTech.
- Prat, P., Ledesma, A., Cuadrado, A. & Levatti, H., 2013. *Ground penetrating radar system for detection of desiccation cracks in soils*. s.l., s.n.
- Rodríguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, Volumen 44(6), pp. 644-658.

Capítulo 4 Modelo Numérico

- Aitchison, G., 1965. *Soil properties, shear strength, and consolidation*. 1965, s.n., pp. 319-321.
- Alonso, E. E., Gens, A. & Josa, A., 1990. A constitutive model for partially saturated soil. *Géotechnique*, Volume 40, pp. 405-430.
- Ávila, G., 2004. Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. *PhD Thesis*, p. 283.
- Ávila, G., Ledesma, A. & Lloret, A., 2002. Measurement of fracture mechanics parameters for the analysis of cracking in clayey soils. *Proceedings 3rd Int. Conf. Unsat. Soils.*, Volume 2, pp. 547-552.
- Babuska, I., 1971. Error bounds for finite element methods. *Num. Math.*, Issue 16, pp. 322-333.
- Babuska, I., 1973. The finite element method with Lagrange multipliers. *Num. Math.*, Issue 20, pp. 179-192.
- Bishop, A., 1959. The principles of effective stress. *Tek. Ukebl.*, Volume 39, pp. 859-863.
- Bishop, A. & Blight, G., 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, Volume 13(3), pp. 177-197.
- Blight, G., 1965. *A study of effective stresses for volume change*. s.l., s.n., pp. 259-269.
-

- Borst, R. D. et al., 2004. Cohesive-zone models, higher-order continuum theories and reliability methods for computational failure analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 60, pp. 289-315.
- Brezzi, F., 1974. On the existence, uniqueness and approximations of saddle point problems arising from Lagrange multipliers. *RAIRO Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, Issue 8, pp. 129-151.
- Broek, D., 1986. Elementary Engineering Fracture Mechanics (4th Edition).
- Burland, J., 1965. *Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soil*. Butterworths, Sydney, s.n., pp. 270-278.
- Corte, A. & Higashi, A., 1960. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soils. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment*, Volume 66.
- Erdogan, F. & Sih, G. C., 1963. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), pp. 519-527.
- Fredlund, D. & Morgenstern, N., 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Geotechnical Engineering Div. ASCE*, Volume 103, pp. 447-466.
- Garolera, D. et al., 2013. *Zero-thickness interface elements with HM coupling, formulation and applications in Geomechanics*. Barcelona, CIMNE.
- Griffith, A. A., 1921. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Volume 221, pp. 163-198.
- Griffith, A. A., 1924. *The theory of rupture*. Delft, Netherlands, s.n., pp. 55-63.
- Inglis, C., 1913. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *T. Inst. Naval Architects*, Volume 55, pp. 219-241.
- Ingraffea, A. R., 1989. *Fracture Mechanics of Rock (Chapter 3)*. s.l.:s.n.
- Irwin, G., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, Volume 24, pp. 361-364.
- Jennings, J. & Burland, J., 1962. Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. *Geotechnique*, Volume 12(2), pp. 125-144.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 34, pp. 477-488.

- Lachenbruch, A. H., 1961. Depth and spacing of tension cracks. *Journal of Geophysical Research*, 66(12), pp. 4273-4292.
- Lakshmikantha, M., 2009. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *PhD Thesis*.
- Lee, F. & K.W. Lo, S. L., 1988. Tension Crack Development in Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Volume 114(8), pp. 915-929.
- Levatti, H. U., 2008. *Formulación e Implementación tipo u-p de un Modelo Mecánico para el Análisis de la Deseccación en Suelos*. Barcelona: CIMNE.
- Levatti, H. U., 2012. *Simulación numérica de procesos de desecación en suelos cohesivos de baja plasticidad. Tesina de Especialidad..* Barcelona(Barcelona): UPCCOMMONS.
- Lloret, A. & Alonso, E., 1985. *State surfaces for partially saturated soils*. San Francisco, California, Publications Committee of XI ICSMFE. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 557-562.
- Matyas, E. & Radhakrishna, H., 1968. Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, Volume 18, pp. 432-448.
- Meinhard, K., 2013. *Finite element in Fracture Mechanics. Theory, numerics and Applications*. Freiberg: Springer.
- Mergheim, J., Kuhl, E. & Steinmann, P., 2005. Finite element method for the computational modeling of cohesive cracks. *International journal of numerical methods in engineering*, Volume 63, pp. 276-289.
- Morris, P., Graham, J. & Williams, D., 1992. Cracking in Drying Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 29(2), pp. 263-277.
- Olivella, S., 1995. *Nonisothermal multiphase flow or brine and gas through saline media. PhD Thesis..* Barcelona: s.n.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E. E., 1996. Numerical formulation for simulator (CODE_BRIGHT) for coupled analysis of saline media. *Engineering computations*, 13(7), pp. 87-112.
- Oliver, J., Huesped, A. & S. Blanco, D. L., 2005. Stability and robustness issues in numerical modeling of material failure with the strong discontinuity approach. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, Volume 195.
- Orowan, E., 1948. Fracture and Strength of Solids. *Reports on Progress in Physics XII*, pp. 185-232.
- Prat, P. C. et al., 1993. *DRAC: a computer software for the analysis of rock mechanics problems*. Xian, China, Shaanxi Science and Technology Press, pp. 1361-1368.

- Prat, P., Ledesma, A. & Cabeza, L., 2002. Drying and Cracking of soils: Numerical Modelling.. *8th Int. Conference on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG VIII*, pp. 705-711.
- Rodríguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 44(6), pp. 644-658.
- Trabelsi, H., Jamei, M., Zenzri, H. & Olivella, S., 2012. Crack patterns in clayey soils: Experiments and modeling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Volume 36, pp. 1410-1433.
- VanGenuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), pp. 892-898.
- Weinberger, R., 1999. Initiation and growth of cracks during desiccation of stratified muddy sediments. *Journal of Structural Geology*, Volume 21, pp. 379-386.
- Zienkiewicz, O. C. et al., 1990a. Static and dynamic behaviour of soils: a rational approach to quantitative solutions I Fully saturated problems. *Proceedings Royal Society London*, Volume A429, pp. 285-309.
- Zienkiewicz, O. C. et al., 1990b. Static and dynamic behaviour of soils: a rational approach to quantitative solutions II Semi-Saturated problems. *Proceedings Royal Society London*, Volume A429, pp. 311-321.
- Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L., 1989. *Finite Element Method*. London: McGraw-Hill.

Capítulo 5 Simulaciones Numéricas

- Barrera, M., 2002. Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables. En: *Tesis Doctoral*. Barcelona: UPC.
- Bronswijk, J. J., 1988. Modelling of water balance, cracking and subsidence in clay soils. *Journal of Hydrology*, 97(3-4), pp. 199-212.
- Corte, A. & Higashi, A., 1960. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soils. *U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment*, Volumen 66.
- Fredlund, D. & Morgenstern, N., 1977. Stress State Variables for Unsaturated Soils. *Geotechnical Engineering Div. ASCE*, Volumen 103, pp. 447-466.

- Griffith, A. A., 1921. The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, Volumen 221, pp. 163-198.
- Griffith, A. A., 1924. *The theory of rupture*. Delft, Netherlands, s.n., pp. 55-63.
- Kodikara, J., Nahlawi, H. & Bouazza, A., 2004. Modeling of curling in desiccating clay. *Canadian Geotechnical J.*, 41(3), pp. 560-566.
- Konrad, J. & Ayad, R., 1997a. Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations. *Canadian Geotechnical Journal*, Volumen 34, pp. 929-942.
- Lakshmikantha, M., 2009. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *PhD Thesis*.
- Lakshmikantha, M. R., Prat, P. C. & Ledesma, A., 2013. Evidences of hierarchy in cracking of drying soils. *C.L.Meehan, D. Pradel, M.A. Pando & J.F. Labuz (Eds.) Stability and Performance of Slopes and Embankment III*, Volumen 231, pp. 782-789.
- Lakshmikantha, M. R., Reig, R., Prat, P. C. & Ledesma, A., 2013. Origin and mechanism of cracks seen at the bottom of desiccating soil specimen. *C.L. Meehan, D. Pradel, M.A. Pando & J.F. Labuz (Eds.) Stability and Performance of Slopes and Embankments III*, Volumen 231, pp. 790-799.
- MathWorks, 2013. *Matlab R2013b*. [En línea].
Available at: uk.mathworks.com.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2002. *Experimental observations on curling of desiccating clay*. Recife, Brasil, s.n., pp. 553-556.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J., 2006. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering*, Volumen 24, pp. 1641-1664.
- Navarro Gámir, Vicente, 1997. Modelo del Comportamiento Mecánico e Hidráulico de Suelos no Saturados en Condiciones no Isotermas. Tesis Doctoral UPC.
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1(5), pp. 318-333.
- Rodríguez, R., Sanchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 44(6), pp. 644-658.
- VanGenuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44(5), pp. 892-898.

Anexo A

Ecuación Constitutiva Mecánica en 2D

1. Relación Tensión Deformación Para Suelos No Saturados En Deformación Plana

En estado plano de deformaciones con $\varepsilon_z = 0$, la relación tensión deformación se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= d_{11}\varepsilon_x + d_{12}\varepsilon_y + \frac{u_w}{3K^s} \\ \sigma_y &= d_{21}\varepsilon_x + d_{22}\varepsilon_y + \frac{u_w}{3K^s} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = G\varepsilon_{xy} \\ \sigma_z &= d_{12}\varepsilon_x + d_{12}\varepsilon_y + \frac{u_w}{3K^s}\end{aligned}\tag{A.1}$$

Dónde:

$$\begin{aligned}d_{11} &= d_{22} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = c_2 E & c_1 &= \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ d_{12} &= d_{21} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = c_1 E & c_2 &= \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} & c_3 &= \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)}\end{aligned}\tag{A.2}\tag{A.3}$$

Se asume que el módulo de Young, E , varía con el grado de saturación (o el contenido de humedad). La ley de variación se obtiene de ensayos de laboratorio midiendo el módulo de elasticidad para distintos valores de grado de saturación o contenido de humedad. Un ejemplo de dicha relación se muestra en la Figura A.1.

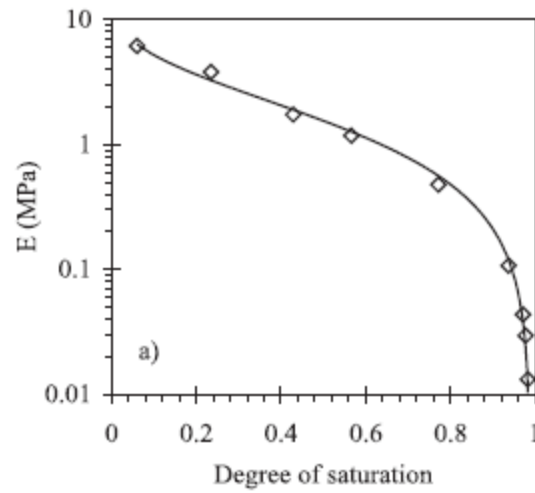


Figura A.1 - Relación entre Módulo de Elasticidad E y el Grado de Saturación de agua del Suelo

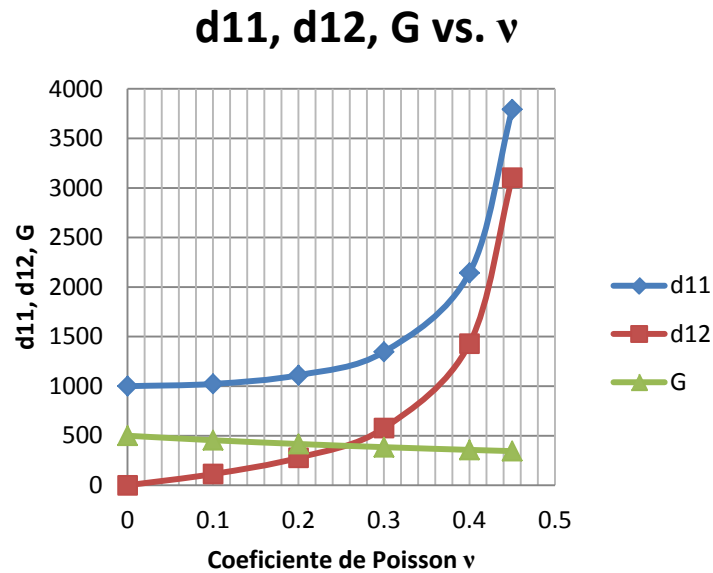


Figura A.2 - Relación entre los Coeficientes Elásticos d_{11} , d_{12} y G
Adoptando $E=1000$

2. Análisis de la influencia del módulo de Poisson en los coeficientes de la relación tensión-deformación para suelos no saturados:

Como puede verse en las ecuaciones: (A.1), (A.2) y (A.3); los coeficientes elásticos dependen del módulo de Young E y del módulo de Poisson ν .

En la Figura A.2, se muestra la relación entre los valores del coeficiente de Poisson ν y los coeficientes d_{11} , d_{12} y G .

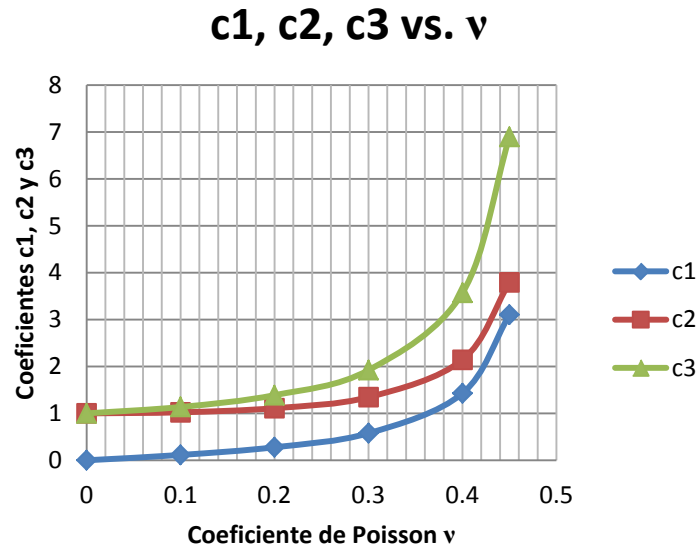


Figura A.3 - Relación entre los Coeficientes Elásticos c_1 , c_2 , c_3 y ν
Adoptando $E=1000$

Tabla A.1 - Relación entre coeficientes elásticos 1

ν	$d_{11}=d_{22}$	$d_{12}=d_{21}$	G
0.00	1000.00	0.00	500.00
0.10	1022.73	113.64	454.55
0.20	1111.11	277.78	416.67
0.30	1346.15	576.92	384.62
0.40	2142.86	1428.57	357.14
0.45	3793.10	3103.45	344.83

Tabla A.2 - Relación entre coeficientes elásticos 2

	c_1	c_2	c_3
ν	$\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$	$(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)$	$1/(1+\nu)(1-2\nu)$
0.00	0.00	1.00	1.00
0.10	0.11	1.02	1.14
0.20	0.28	1.11	1.39
0.30	0.58	1.35	1.92
0.40	1.43	2.14	3.57
0.45	3.10	3.79	6.90

En la Figura A.3 se presenta la relación entre los coeficientes elásticos c_1 , c_2 y c_3 con el módulo de Poisson ν . Las gráficas de la Figura A.2 y de la Figura A.3, se obtienen de la Tabla A.1 y la Tabla A.2 respectivamente.

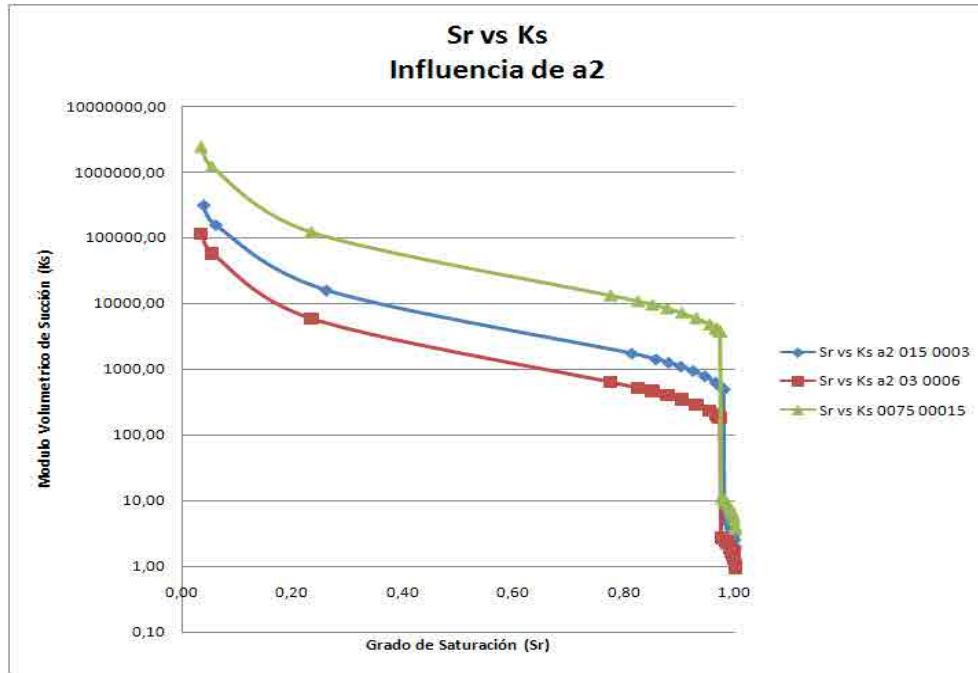


Figura A.4 – Influencia del parámetro a_2 de la superficie de estado en las propiedades mecánicas del suelo

3. Influencia de los Parámetros de la Superficie de Estado en las Propiedades Mecánicas del Suelo

Como se ha visto en el Capítulo 4, Modelo Numérico, la relación constitutiva mecánica del modelo presentado en esta tesis, depende de la ecuación de la superficie de estado:

$$\Delta e = a_1 \Delta \ln(p' + a_4) + a_2 \Delta \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) + a_3 \Delta \left[\ln(p' + a_4) \ln \left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}} \right) \right] \quad (A.4)$$

Los parámetros de la ecuación de la superficie de estado definen las propiedades elásticas del material.

En la Figura A.4 se observa la influencia del parámetro a_2 en los valores del módulo volumétrico a succión. Además, se observa la variación de dicho módulo con el grado de saturación.

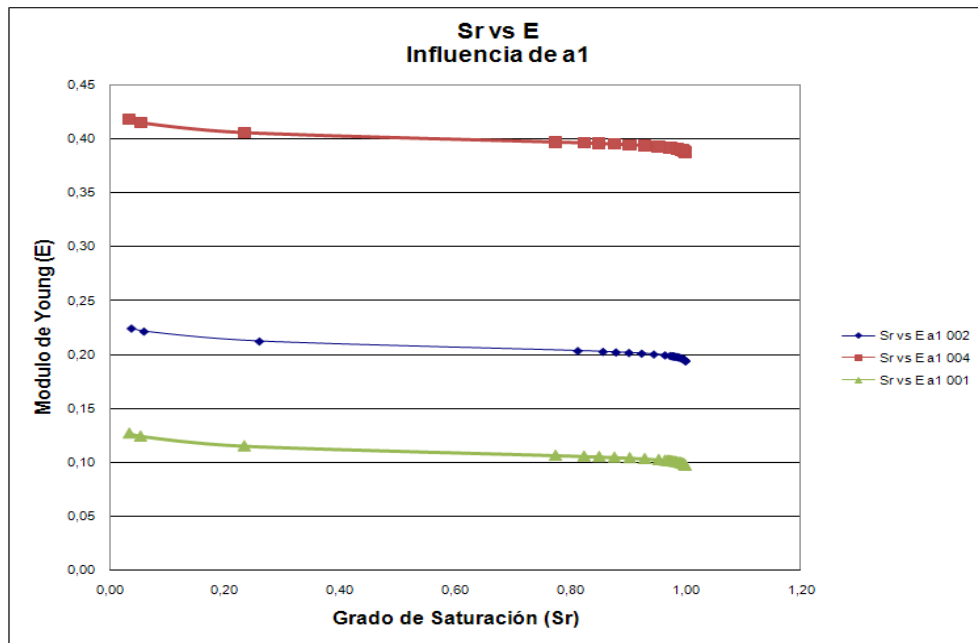


Figura A.5 – Influencia del parámetro a_1 de la superficie de estado en las propiedades mecánicas del suelo

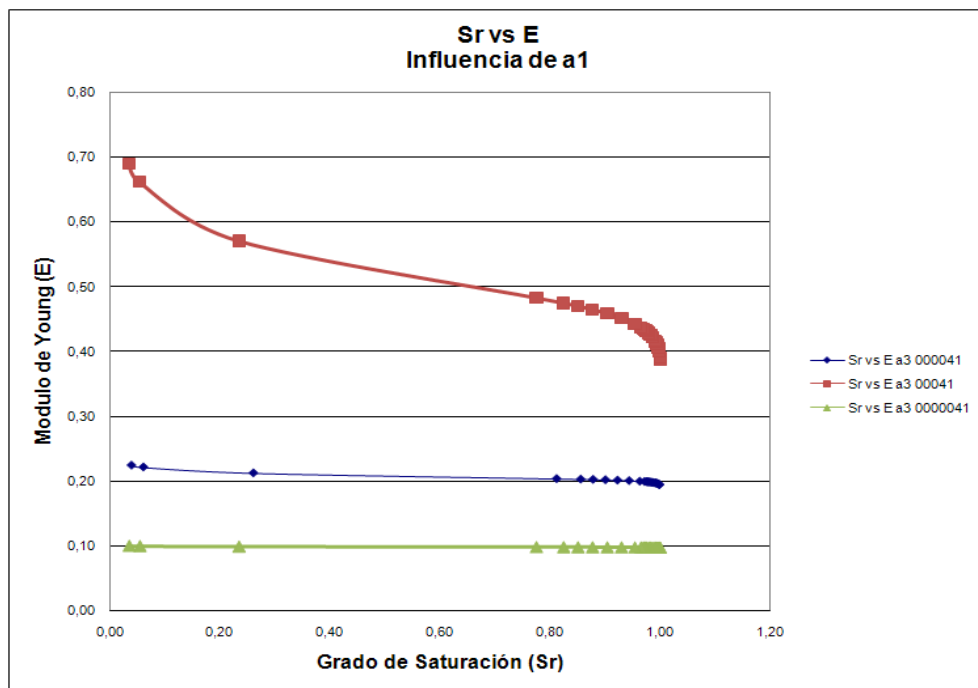


Figura A.6 – Influencia del Parámetro a_3 de la Superficie de Estado en las Propiedades Mecánicas del Suelo

En la Figura A.5 se observa la influencia del parámetro a_1 de la ecuación A.4, en el módulo de Young. Además, como en el caso anterior, se observa la variación de dicho módulo con el grado de saturación.

4. Algunos de los Parámetros Utilizados en las Simulaciones

Tabla A.3 – Algunos parámetros utilizados en las simulaciones

PARÁMETROS	Símbolo	Unidad	Residuo Minero	Arcilla
Parámetros hidráulicos				
Peso específico	γ	Mg/m ³	3.97	1.8
Módulo volumétrico del agua	K_w	MN/m ²	50	50
Contenido volumétrico de agua saturado	θ_s		0.6	0.7
Contenido volumétrico de agua residual	θ_r		0.075	0.1
Presión de referencia	P_0	MPa	1.05	1.05
Permeabilidad saturada inicial	K_0	m/s	2.50E-09	2.60E-09
Parámetros de Van Genuchten				
Función f_n				
	η		1	-
	λ		0.39	-
Parámetro de la permeabilidad relativa				
	r		3	3
Parámetro de la permeabilidad saturada				
	b		25	25
Parámetros mecánicos				
Módulo de elasticidad	E	kPa	1700	1600
Módulo volumétrico del suelo	K	kPa	-	-
Módulo de corte	G		-	-
Módulo de Poisson	ν		0.3	0.3
Porosidad inicial	n_0			
Relación de vacíos inicial	e_0			
Parámetros de la superficie de estado				
	a_1		-0.02	-0.019
Valores bajos de succión	$a_{2 \text{ bajo}}$		-0.15	-
Valores altos de succión	$a_{2 \text{ alto}}$		-0.003	-0.0029
	a_3		-0.00041	-0.0004
	a_4		0.001	0.0009
	P_{ref}	MPa	0.1	0.1

Finalmente, en la Figura A.6, se presenta la variación del módulo de Young con el parámetro a_3 de la ecuación de la superficie de estado. Una vez más, la figura muestra también la variación respecto del grado de saturación del suelo.

Anexo B

Curva de retención

La relación que existe entre el grado de saturación y la succión, es un hecho que puede medirse experimentalmente y para el cual existen varias expresiones analíticas, “Closed-forms”, (B.1). Se adopta la expresión de curva de retención de (vanGenuchten, 1980):

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P_0 f_n} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (\text{B.1})$$

$$f_n = \exp[-\eta(n - n_0)] \quad (\text{B.2})$$

Donde λ , es un parámetro material y P_0 es el valor de entrada de aire para un valor de porosidad n_0 , adoptado como un valor de referencia. f_n , es una función propuesta que tiene en cuenta la influencia de la porosidad en la curva de retención mediante el parámetro η . Si el medio es indeformable la función f_n tiene un valor unidad, puesto que la porosidad es constante. Por último la succión s , es en nuestro caso particular la presión de agua en los poros $s = -p$, con lo cual¹:

$$f_n = \exp[-\eta(n_0 - n_0)] = 1 \Rightarrow S_r = \left[1 + \left(\frac{-p}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (\text{B.3})$$

Esta última expresión relaciona dos campos escalares, el grado de saturación y la presión de agua en los poros. El parámetro λ , es adimensional y depende del suelo. La presión de referencia se asume: $P_0 = 1.05$ [MPa].

¹ En la expresión de van Genuchten, se utiliza p para denotar a la presión de poro de agua en lugar de u_w . Hasta aquí, se había utilizado esta última para distinguirla de la presión media neta o total.

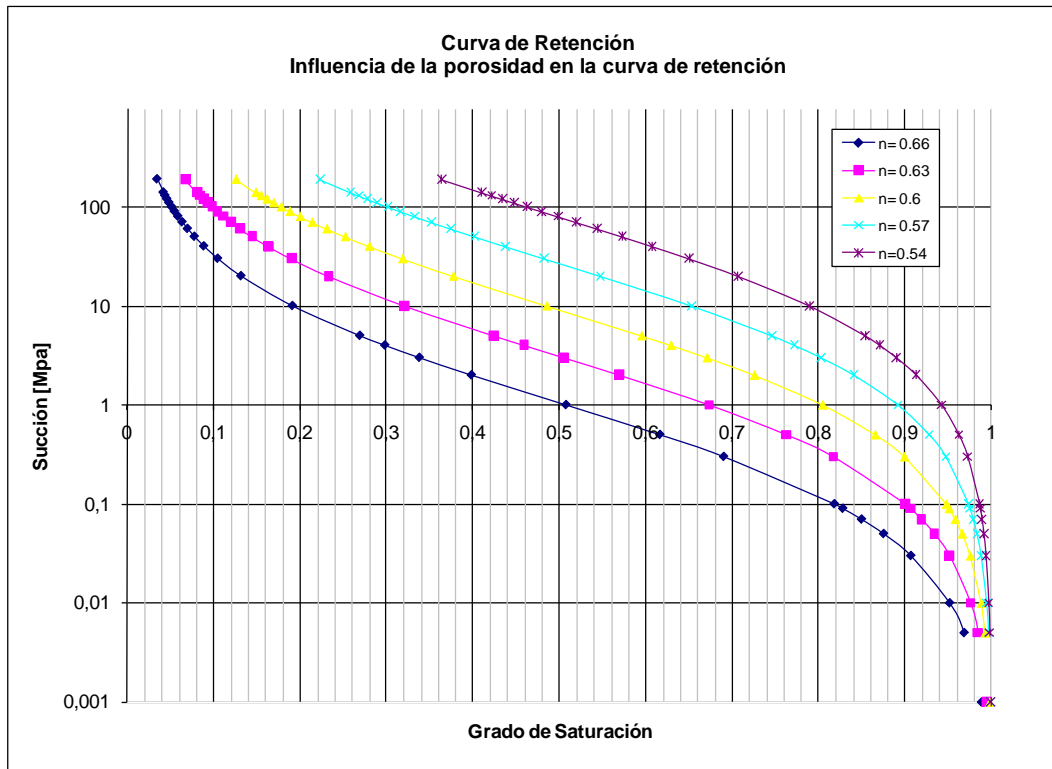


Figura B.1 - Influencia de la porosidad en la curva de retención de (vanGenuchten, 1980)

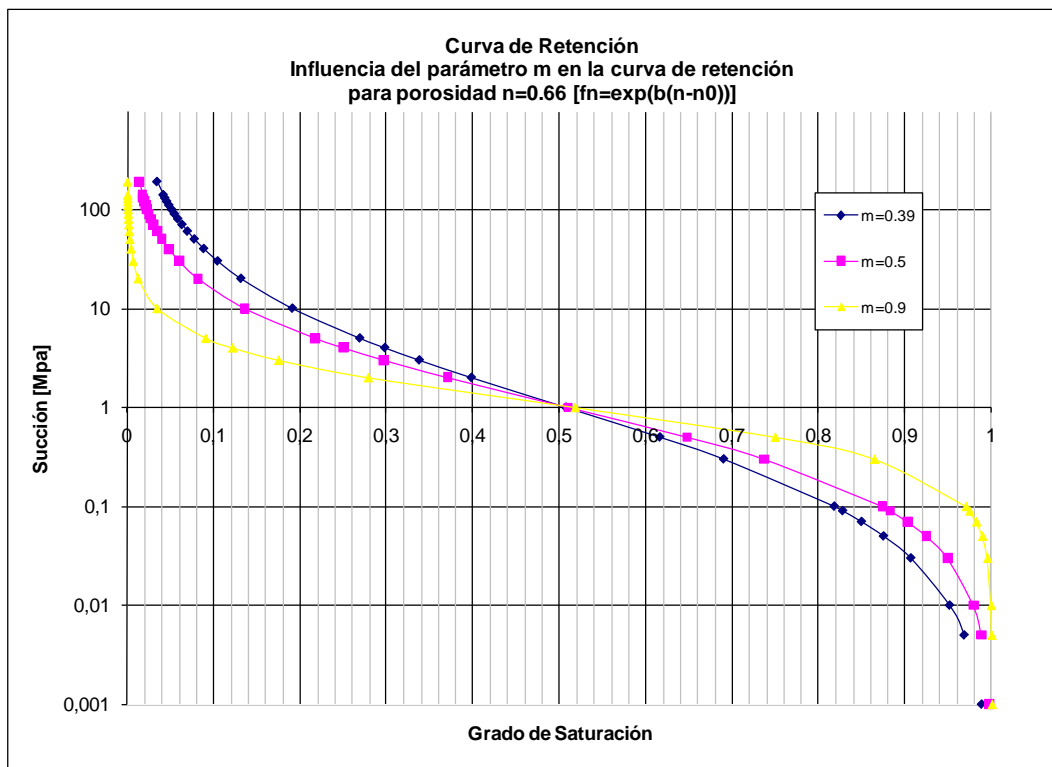


Figura B.2 - Influencia del parámetro m en la curva de retención para una porosidad de $n = 0.66$

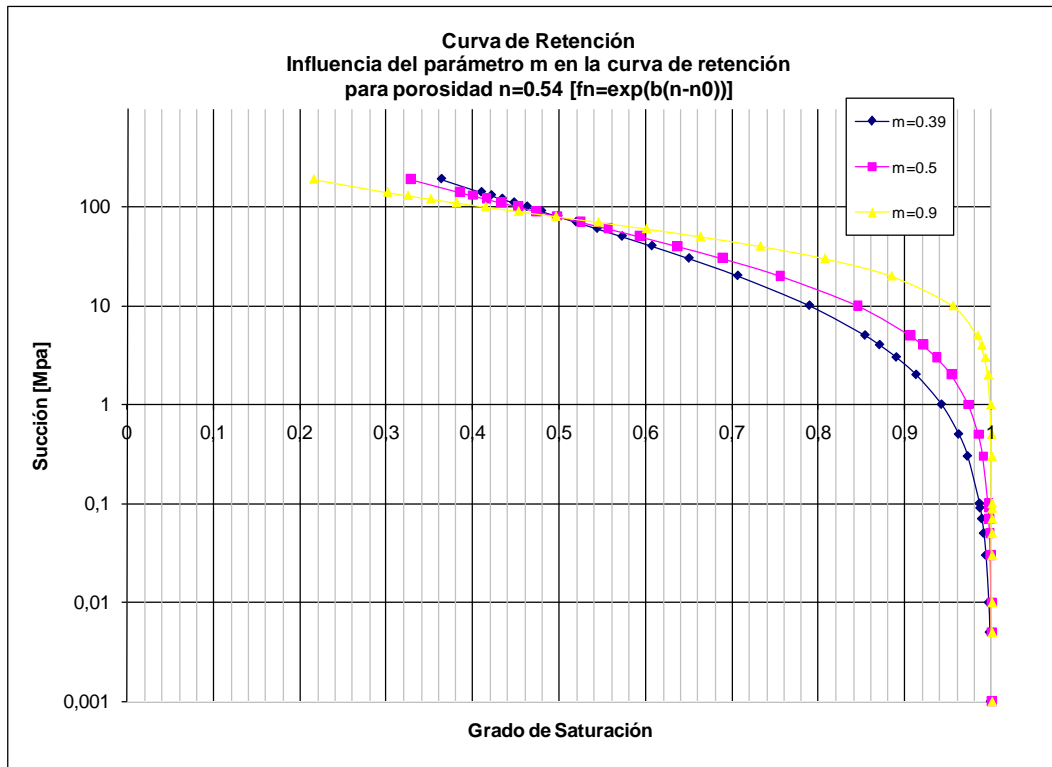


Figura B.3 - Influencia del parámetro m en la curva de retención para una porosidad de $n = 0.54$

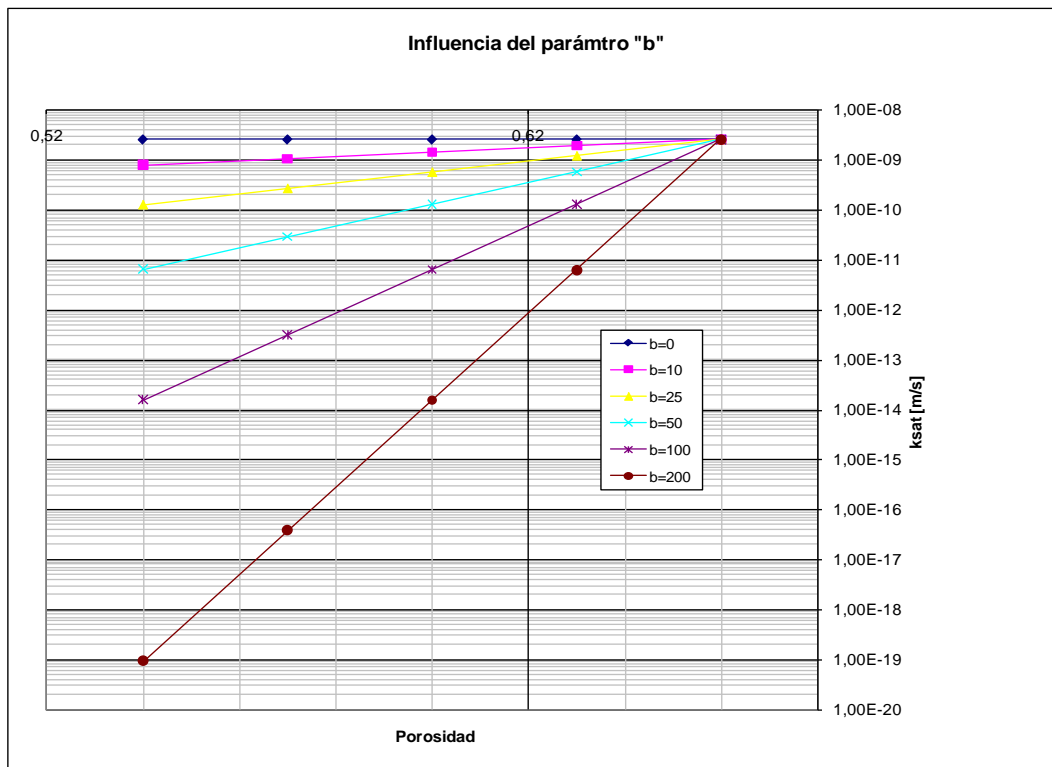


Figura B.4 - Influencia de la porosidad en la conductividad hidráulica para distintos valores del coeficiente b ó η .

1. Parámetros de la curva de retención. Influencia de la porosidad en la curva de retención de van Genuchten.

Por tratarse el problema de desecación mediante un modelo hidromecánico, la masa de suelo se deformará a la vez que se produzcan flujos de agua en su interior. En la curva de retención, esto se ve reflejado mediante la función f_n tal como se indica en la ecuación (B.3). En la Figura B.1, se observa la influencia de la porosidad (n) en la curva de retención para valores de $n = 0.54$ a 0.66 .

2. Influencia del parámetro “ λ ” ó “ m ” de la curva de retención

El parámetro λ , que aparece en la ecuación (B.1), suele designarse también con la letra “ m ” en la literatura. En la Figura B.2 y Figura B.3, se ve la influencia en la curva de retención para dos valores dados de la porosidad $n = 0.66$ y $n = 0.54$ respectivamente.

3. Influencia del parámetro η ó b de la curva de retención

Este parámetro, a veces denominado η y a veces b , modifica la influencia de la porosidad inicial e instantánea sobre el grado de saturación. En otras palabras, ajusta la función f_n que controla el efecto del cambio de porosidad en la curva de retención. En la Figura B.4, se observa la influencia del parámetro en los valores de permeabilidad saturada en relación a la porosidad.

Anexo C

Sistema de Georadar, humidostato y humidificador

1. Bases técnicas de los sistemas de Georadar

El GPR (acrónimo de Ground Penetrating Radar) es una técnica electromagnética de alta resolución para sondear materiales. Se utiliza en la auscultación del terreno y también de estructuras preexistentes para determinar la existencia de oquedades o estructuras metálicas o bien conducciones.

Lleva un desarrollo de unos 40 años y es una técnica de prospección geofísica emparentada con las técnicas utilizadas para el estudio de sismos.

Se dice que es una técnica dependiente del tiempo en el sentido de que básicamente analiza el tiempo que las ondas necesitan para traspasar y rebotar en los medios donde son emitidas.

El resultado de la irradiación del medio mediante estas ondas acaba en una serie de imágenes bidimensionales y cuasi 3D obtenidas por técnicas de post-proceso que permiten interpretar que hay dentro de la masa de materia analizada.

Para mejorar la interpretación añade si es necesario distintas alternativas en cuanto a post-proceso para mejorar la interpretación de los rebotes de las ondas emitidas.

Es en general bastante precisa a la hora de determinar la profundidad de estratos de material, así como también detectar la presencia de armaduras o conducciones metálicas. Ha mostrado en general sensibilidad respecto de la detección de oquedades y espacios vacíos, lo cual hace pensar que es idóneo para la detección de grietas por desecación.

En definitiva se trata de un método de prospección geofísica. En la Figura C.1 se puede ver que este método es un método geofísico dependiente de la permitividad y conductividad del medio.

Método Geofísico	Propiedad Física Dependiente	Aplicaciones							
		Exploración de hidrocarburos	Estudios geológicos regionales (>100 Km ²)	Desarrollo y exploración de depósitos minerales	Geotecnia Ingeniería	Hidrogeología	Detección de cavidades y objetos enterrados	Lixiviados y penachos de contaminación	Localización de objetos metálicos
Gravimetría	Densidad								
Magnetometría	Susceptibilidad magnética								
Sísmica de refracción	Modelo elástico, densidad								
Sísmica de reflexión	Modelo elástico, densidad								
Eléctricos (SEV, Tomografías geoelectricas)	Resistividad eléctrica								
Potencial espontáneo	Diferencias de potencial								
Polarización inducida	Resistividad y capacidad eléctrica								
Electromagnetismo	Conductividad								
EM-VLF	Conductividad								
EM Georadar	Permitividad y conductividad								
Magneto-telúrico	Resistividad eléctrica								





 Método más adecuado
 Método secundario y complementario
 Inservible
 Método que puede ser utilizado aunque no es muy recomendado

Figura C.1 - Métodos de prospección geofísica

1.1. Principios fundamentales

Se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Se detectan las reflexiones de las ondas debidas a la discontinuidad del medio donde son propagadas. Las discontinuidades vienen dadas por los cambios en los parámetros electromagnéticos: conductividad, permitividad eléctrica y electromagnética.

Las reflexiones registradas se representan en un radargrama. Que es como un corte del medio donde se han detectado las anomalías.

Un rayo de ondas atraviesa el medio hasta que cambian las propiedades donde se produce la refracción de la onda y la reflexión parcial de la energía de la misma, la antena recibe esta información que es gravada y posteriormente interpretada. La Figura C.2 muestra el comportamiento de un as de ondas al atravesar dos medios distintos.

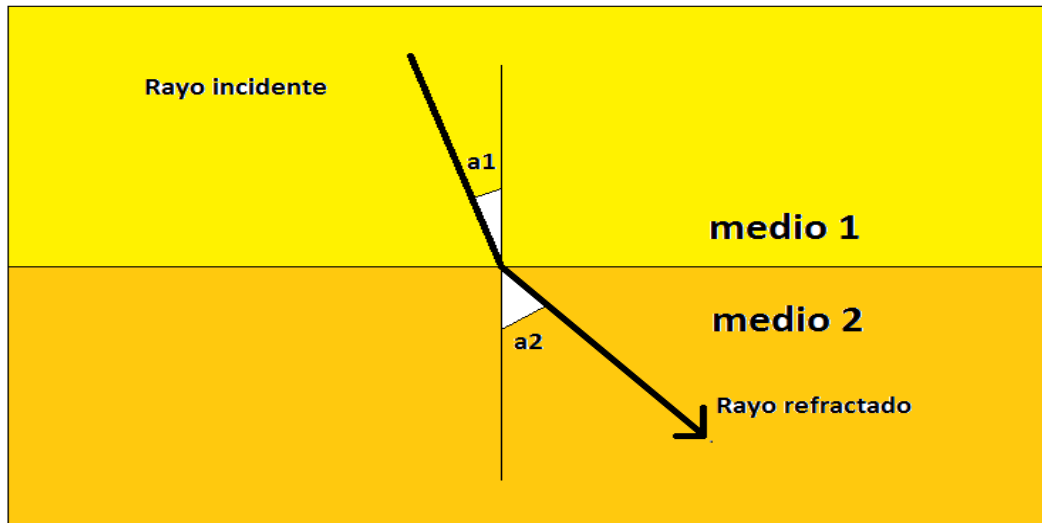
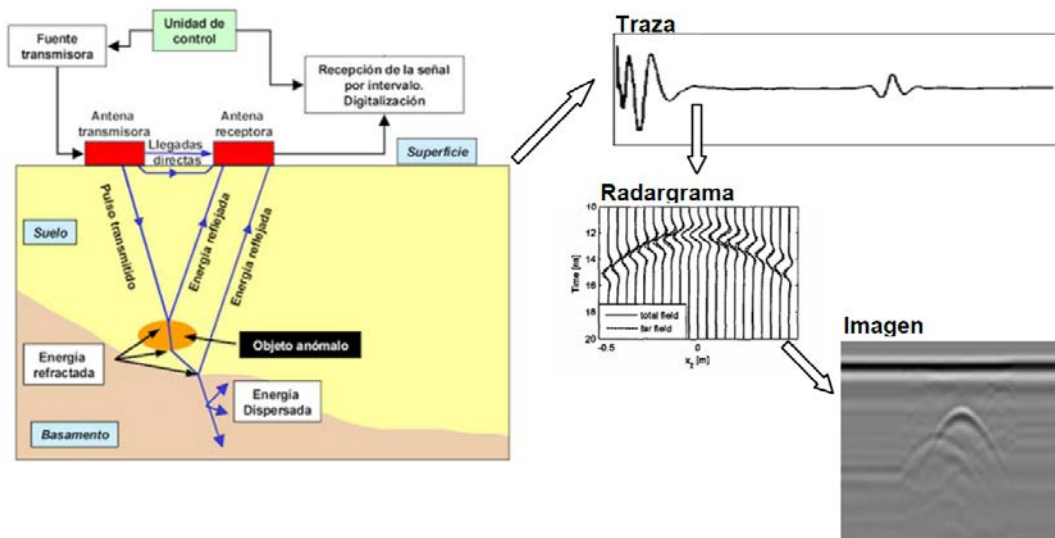


Figura C.2 - Propagación de ondas en medios distintos



Obtención de imágenes a través de prospección por GPR.

Figura C.3 - Esquema de funcionamiento de Georadar

La antena emisora envía una señal al suelo, la cual puede ser reflejada, refractada o difractada. Cuando la onda encuentra anomalías (oquedades, grietas, partículas, sensores, etc.) parte de la energía de la onda se refleja y parte se transmite. La señal reflejada es amplificada, transformada al espectro de audio-frecuencia y registrada.

StructureScan™ Mini



Diseño Compacto

Mini StructureScan está diseñada para ajustarse fácilmente a su mano, y para hacer que la inspección de concreto/hormigón en espacios reducidos no sea un obstáculo más

Herramienta Integrada

Herramienta de inspección de concreto/hormigón Todo en Uno – antena, sistema de posicionamiento y conjunto de unidad de control

Detecta objetivos Automáticamente

La Mini StructureScan ofrece capacidades automáticas de detección de objetivos por medio de pequeños círculos que identifican los objetivos de interés para ayudar en la interpretación de datos

Durabilidad

Resistente revestimiento de plástico y ruedas para un rendimiento de larga duración

Valor

La perfecta combinación de funcionamiento y costo

1 Sistema de Penetración al Suelo Todo-en-Uno

2 Manija y controles ergonómicos

3 Pantalla a colores para presentación de datos

4 Vehículo/carrito de Inspección con codificador

5 Guiador laser para localización



www.geophysical.com

Especificaciones

Frecuencia central: 1600 MHz

Alcance de Profundidad: 16 inches (41 cm)

Peso de la unidad (con batería): 3.3 pounds (1.6 kg)

Dimensiones: 6 (w) x 7 (h) x 9 (l) in.

(15.24 x 17.78 x 22.86 cm)

Figura C.4 - Especificaciones técnicas del equipo de Georadar StructureScan Mini de GSSI.

Los parámetros que caracterizan el medio electromagnéticamente son tres:

La conductividad σ representa la medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica.



Figura C.5 – Humidostato EH3 DST

La permitividad dieléctrica ϵ brinda la medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico.

Finalmente la medida de la capacidad de un medio para atraer los campos magnéticos viene descrita por la permeabilidad magnética μ .

La Figura C.3 muestra un esquema de funcionamiento de los sistemas de georadar. Como puede verse, el equipo se va desplazando sobre el suelo a la vez que emite y recibe señales de ondas que posteriormente son interpretadas y producen una imagen pos procesada que permite el análisis del interior de la masa de suelo.

1.2. Especificaciones técnicas del equipo

Las ruedas del equipo determinan las distancia y si el equipo está o no en movimiento. El equipo lleva incorporado un emisor y la antena receptora de ondas. Además de esto cuenta con un software de post-proceso que permite visualizar en tiempo real las gráficas que se van obteniendo de los distintos escáneres.

2. Humidostato de control electrónico

Controla la humedad relativa del ambiente en %HR, la humedad absoluta en g/kg, el Dew-point en °Cdp y la temperatura en °C, K o °F.

Two closing contacts: Possible to choose source from one of the four parameters above to each relay. Used for controlling one dehumidifier in two steps or to control two separate dehumidifiers. Can also be used for dehumidifying on one relay and temperature control on the other.

Display and diodes: 2 row display where two parameters can be monitored. Green "Normal" LED and red "Alarm" LED, switches at a set value of any of the four parameters.

Analogue outputs: 2 outputs with Vdc or mA, choose source from the PI-regulator or one of the four parameters above.

PI – regulator: Controls energy-saving on a three phase dehumidifier or a valve for a cooling coil. Set relative humidity, absolute humidity, dew-point or temperature and EH-3 will keep it constant.

Sensor: Capacitive type moisture sensor from Honeywell with an accuracy of $\pm 2\%RH$ and $\pm 0.5^\circ C$. Each sensor comes with a calibration protocol.

SENSOR

Measuring range:	-30°C up to +80°C, 0-100%RH (not condensing)
Accuracy:	$\pm 2\%RH$ and $\pm 0.5^\circ C$ in the full measuring range
RH stability:	$\pm 1\% RH$ at 50% RH during 5 years
Calibration:	Each sensor comes with a calibration protocol for 0% RH and 75.3% RH. The sensor can easily be changed and after setting the calibration parameters on the display the $\pm 2\% RH$ accuracy is obtained again
Response time:	At low air speed, 30 seconds
Mounting:	10 m sensor cable and wall mounting device included
Optional:	20 m sensor cable

BOX

Dimensions:	Height: 120 mm, depth 90 mm, width 122mm
Display:	2 row LCD
Visual alarm:	Green LED marked "Normal" and red LED marked "Alarm"
Programming:	Four push-buttons for programming
Casing:	IP65,ABS. Surrounding temperature: 0-50°C
Weight:	0.7 kg.
Mounting:	4 screw holes $\varnothing 4mm$, towards the wall. c-c height: 90 mm, c-c width: 110mm. Optional: Frame for panel mounting

Figura C.6 – Especificaciones técnicas del Humidostato EH3 DST

CONNECTIONS & PROGRAMMING

2 separate relays:	Potential free, max 230Vac 16A each. Possible to set parameter: source, on value, differential down to off value and time delay
2 analogue outputs:	Choose between 0-10Vdc, 2-10Vdc, 0-20mA or 4-20mA. Also possible to choose parameter source and scale
PI-regulator:	Occupies one of the analogue outputs if in use. Independent of the two relays
Visual alarm:	Possible to choose parameter source, P-band, I-time and set value
Parameters:	Independent of the two relays. Possible to choose parameter source and value when it should switch between green LED and red LED. Relative humidity %RH, absolute humidity g/kg, dew-point °Cdp and temperature °C/K/°F
Cable size:	Maximum 1 x 1.5 mm ² per terminal
Supply:	230Vac, 50Hz (cable not included)

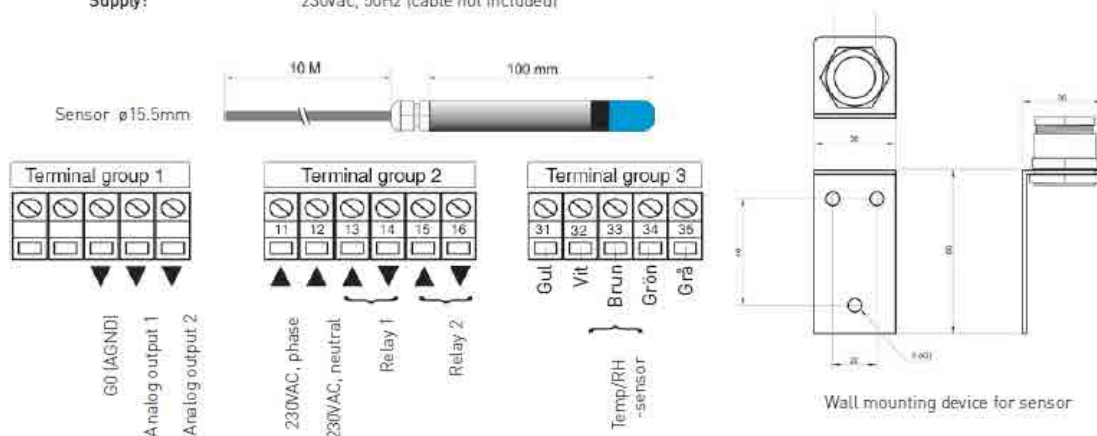


Figura C.7 – Especificaciones técnicas del Humidostato EH3 DST

3. Humidificador

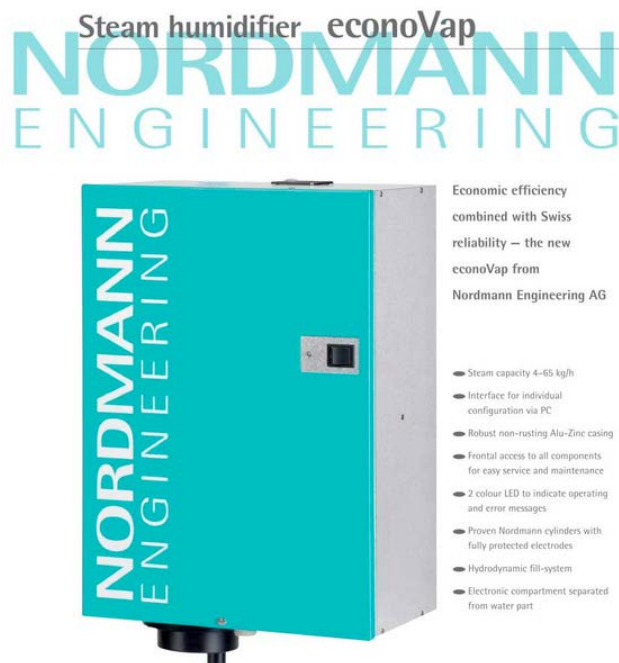


Figura C.8 – Humidificador Nordmann

econoVap

Air humidity is in many areas decisively for a healthy and pleasant climate; for humans, animals, plants, food, technology.

Electrode type humidifiers produce sterile and odorless steam, free of minerals, perfectly hygienic also for applications in the medical and clean room sector.

The econoVap line from Nordmann Engineering AG also suits a small budget, uncomplicated and easy to use. A capacity range of 4–65 kg steam per hour is available in two different casings – of course in the proven quality from Nordmann Engineering AG, Switzerland.

Economical – reliable – professional: the econoVap from Nordmann Engineering AG

Technical specifications econoVap

Type mark:	Type	434			834		1534	2364	3264	4564	6564
Heating voltage	Volt	400 Volt, 50/60 Hz									
Number of phases	~	3			3	3	3	3	3	3	
Heating current	A	4.4			8.8	16.5	25.2	35.1	49.4	71.3	
External fuses p. phase	A	10			16	25	40	50	80	100	
Type mark:	Type	422	432	822	832	1532	2362	3262			
Heating voltage	Volt	230 Volt, 50/60 Hz									
Number of phases	~	1	3	1	3	3	3	3			
Heating current	A	13.2	7.6	26.4	15.3	28.6	43.9	61.0			
External fuses p. phase	A	20	16	40	25	40	63	100			
Steam output	kg/h	4	4	8	8	15	23	32	45	65	
Minimum capacity	kg/h steam	0.8	0.8	1.6	1.6	3	4.6	6.4	9	13	
Nominal power	kW	3.0	3.0	6.1	6.1	11.4	17.5	24.3	34.2	49.4	
Design data:											
Dimensions	width mm	354	354	354	354	490	490	490	490	490	
	height mm	562	562	562	562	672	672	672	672	672	
	depth mm	210	210	210	210	340	340	340	340	340	
Steam outlet diameter	mm	1x22	1x22	1x22	1x22	1x35	1x35	1x35	2x35	2x35	
Weight (empty)	kg	11.5	11.5	12	12	20	21	22.5	24	24	
Operating weight	kg	15	15	18.5	18.5	35	36	47.5	49	49	
Accessories:											
Humidity controller	qty	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Control electronics:											
Supply voltage	Volt	220–240 Volt, 50/60 Hz, 1~									
Proportional adaptor	qty	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Steam distributors for det use:											
Steam nozzle	qty	1	1								
22–xxx mm	qty	1	1	1	1						
35–300 mm	qty					1					
35–450 mm	qty					1	1		2		
35–600, 35–900 mm	qty					1	1	1	2	2	
35–1200, 35–1500 mm	qty										
Steam hose:											
Ø 22/29 mm	qty x m	1	1	1	1						
Ø 35/43 mm	qty x m					1	1	1	2	2	
Condensate hose:											
Ø 6/10 mm	qty x m	1	1	1	1	1	1	1	2	2	
Steam blowers for direct room humidification											
Split mounted	qty	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Other heating voltages on request.

Other heating voltages on request.

Manufacturer:

Nordmann Engineering AG

P.O. Box 109, CH-4143 Dornach 1 / Switzerland

Bruggfeldweg 11, CH-4147 Aesch / Switzerland

Tel. +41 61 467 76 66

Fax +41 61 467 76 77

E-mail: info@nordmann-engineering.com

Internet: www.nordmann-engineering.com

NORDMANN
ENGINEERING

Your local Nordmann dealer:

Operating Conditions

Waterpressure: 1–10 bar (0.1–1 MPa)

Water conductivity: min. 125 to

max. 1250 microSiemen/cm

Operating pressure: 0 bar (pressureless)

Air pressure in the duct: +/- 1000 Pa

Ambient temperature: 1–50°C

Max ambient humidity: 80% rh

Degree of protection: IP21



Quality

All components undergo continuous testing by the manufacturer, thereby guaranteeing the high quality of our products. Nordmann Engineering AG is certified according to ISO 9001:2000 and its production facilities are regularly inspected by TÜV Product Service.

Subject to change without prior notice.

econoVap-0805-E

Figura C.9 – Especificaciones técnicas del Humidificador Nordmann

Se trata de un sistema de humidificación suizo. Las especificaciones se muestran en las Figuras C.8 y C.9.

Anexo D

Publicaciones y Trabajos Relacionados con la Tesis Doctoral

1. Artículos de Revista Internacional (en preparación)

1. Héctor U. Levatti, Pere C. Prat & Alberto Ledesma (2015). *Numerical modelling of drying processes in low-plasticity cohesive soils. Journal of Computers and Geotechnics.*
2. Héctor U. Levatti, Pere C. Prat & Alberto Ledesma (2015). *Study of drying-wetting and inundation cycles in clayey soils using highly instrumented laboratory equipment. Geotechnical Testing Journal.*
3. Héctor U. Levatti, Pere C. Prat & Alberto Ledesma (2015). *Experimental Analysis of 3D Cracking in Drying Soils Using Ground Penetrating Radar. Geotechnical Testing Journal.*

2. Artículos de Congreso

1. Belblidia, F.; Mehmood, S.; Lee, C.H.; Levatti, H.U.; Sienz, J.; Gethin, D.T. and Arnold, C. *Numerical Investigation into Dynamic Loading of Rubber Compound. ACME 2015 8-10/04/2015. Swansea, UK.*
2. Levatti, H.U.; Innocente, M.S.; Morgan, H.D.; Cherry, J.; Lavery, N.P.; Mehmood, S.; Cameron, I. and Sienz, J. *Computational Methodology for Optimal Design of Additive Layer Manufactured Turbine Bracket. SDM-14, 28-30/04/2014. Cardiff, UK.*

3. Morgan, H.D.; Bould, D.; Gil, A.; Levatti, H.U. and Sienz, J. *GE Jet Engine Bracket Challenge: A Case Study in Sustainable Design*. SDM-14, 28-30/04/2014. Cardiff, UK.
4. Prat, P.; Ledesma, A.; Cuadrado A. and Levatti, H.U. *Ground penetrating radar system for detection of desiccation cracks in soils*. COMGEO III. 21-23/08/2013. Krakow, Poland.
5. Levatti, H.U.; Prat, P. and Ledesma, A. *Influence of cracking in the desiccation process of clay soils*. COMPLAS X. 2-4/09/2009. Barcelona, Spain.
6. Levatti, H.U.; Prat, P. and Ledesma, A. *Numerical modelling of desiccation processes in clayey soils*. COMGEO I. 29/04-01/05/2009. Juan-les-Pins, Cote d’Azur, France
7. Levatti, H.U.; Ledesma, A. and Prat, P. *Desecación y Deformación de suelos arcillosos. (Desiccation and deformation in clayey soils)*. METNUM (2009). 29/06-02/07/2009. Barcelona, Spain.
8. P.C. Prat, A. Ledesma, M.R. Lakshmikantha, H.U. Levatti and J. Tapia. *Fracture Mechanics for Crack Propagation in Drying Soils*. 12th IACMAG. 1-6 October, 2008. Goa, India.
9. Levatti, H.U.; Prat, P. and Ledesma, A. *Numerical modeling of formation and propagation of drying cracks in soils*. COMPLAS IX. 5-7/09/2007. Barcelona, Spain.

3. Tesis de Master en Métodos Numéricos (CIMNE, UPC, Barcelona)

Levatti, H.U. (2008). *Formulación e Implementación tipo u-p de un Modelo Mecánico para el Análisis de la Desecación en Suelos. (Formulation and implementation u-p type of a mechanical model for desiccation analysis in soils)*. Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya & CIMNE. Barcelona, Spain.

4. Tesina de Final de Carrera Ingeniero de Caminos (ETSECCPB, UPC, Barcelona)

Levatti, H.U. (2012). *Simulación numérica de procesos de desecación en suelos cohesivos de baja plasticidad. (Numerical simulation of desiccation processes in cohesive low plasticity soils)*. Advisors: Pere Prat y Alberto Ledesma.

5. Participación en Proyectos Competitivos en España

- a) GRIDES BIA2003-03417. (Período 1/12/2003-30/11/2006). Grietas Por Deseccación en Suelos: Identificación de los Mecanismos de Formación y Propagación y Aplicación a la Evaluación de Riesgos. **Becario FPI del Ministerio de Educación y Ciencia del Reino de España.**
- b) AGAUR. Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca. Proyecto 2005SGR-00842. (Período 19/1/2005 - 19/10/2008). **Titulado Universitario en Formación.**
- c) ENVOSCRACK CGL2006-09847. (Período 1/10/2006-30/09/2009). Efecto de las Oscilaciones Medioambientales en la Formación y Propagación de Grietas en Suelos. **Becario FPI del Ministerio de Educación y Ciencia del Reino de España.**
- d) EVOCK-3D BIA2009-08341. (Período 1/10/2010-31/12/2012). Fisuración Tridimensional en Suelos Debida a Oscilaciones de Variables Medioambientales. **Investigador Contratado por la UPC.**
- e) AGAUR. Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca. Proyecto 2009SGR-180. (Período 11/07/2009 - 30/04/2014). **Titulado Universitario en Formación.**
- f) AIRSOIL ESP2013-2015. Interacción Suelo-Atmósfera: Implicaciones en el Agrietamiento de Suelos. **Estudiante de Doctorado.**

6. Actividad Actual (Universidad de Swansea, Reino Unido)

Proyecto ASTUTE (Advance Sustainable Manufacturing Technologies, www.astutewales.com)

Periodo: desde 11/2012 a la fecha

Puesto: **Research Officer.**

Anexo E

Apéndice Digital

Contenido del CD

1. Resultados de Ensayos de Laboratorio

- 1.1. Georadar. Muestra Cilíndrica de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura*
- 1.2. Bandeja Rectangular de 35.1 cm \times 25.4 cm \times 1 cm*
- 1.3. Bandeja Rectangular de 42.0 cm \times 59.4 cm \times 1 cm*
- 1.4. Muestra Cilíndrica de 40 cm de diámetro \times 10 cm de altura. Secado Rápido.*
- 1.5. Muestra Cilíndrica de 80 cm de diámetro \times 10 cm de altura. Ensayo de Ciclos.*

2. Simulaciones Numéricas

2.1. Código de Elementos Finitos

Código de elementos finitos que resuelve el problema hidromecánico para el caso de desecación de cilindro de longitud infinita con la asunción de estado plano de deformación.

A continuación se presenta parte del código de la primera subrutina para lanzar el cálculo:

main.m

La versión completa del código se encuentra en el CD adjunto.

```

% Código Hidromecánico que resuelve el problema de desecación
clear all; close all; clc;
gamma=0.02; Kw=50; theta_s=0.6; theta_r=0.075; P0=1.05; alfa=1/P0; eta=1;
eme=0.39; n=1/(1-eme); L=3; mul=1e-3; k0=2.22e-9; bb=25; nu = 0.3;
n0=theta_s; e0=n0/(1-n0);
a1=-0.02; a2_baja_succ=-0.15; a2_alta_succ=-0.0025; a3=-0.000041; a4=0.025;
p_ref=0.1;
par_sup_estado=[a1 a2_baja_succ a2_alta_succ a3 a4 p_ref];
p_neta=0.3e-3; e1=[0,0]; e2=[.5,.05]; nex=20; ney=10;
min=100; max=100;
elemtype = 1;
if elemtype==1
    nne=3;
    npl=2;
else if elemtype==2
    nne=6;
    npl=3;
else
end
end
nodoref=188; nodosref=[194 188 182]; faccorr=0.01;
coor=[-0.1948    -0.0453
      ...      ...];
nnodos=size(coor,1);
elem=[9    10    2
      ...    ...    ...];
porosidad=ones(1,nnodos)*n0; porosidad0=porosidad;
alfa_nodos=ones(1,nnodos)*alfa;
nelem=size(elem,1);
if elemtype==1
    elem3=[elem, ones(size(elem,1),3)*2, zeros(size(elem,1),1)];
else if elemtype==2
    elem3=[elem, ones(size(elem,1),3)*3, zeros(size(elem,1),1)];
else
end
end
xcoor=coor(:,1);
ycoor=coor(:,2);
xini=coor(:,1);
yini=coor(:,2);
nelemcentral=[164 188 187];
dcon=[nelemcentral*2-1 nelemcentral*2];
cc=size(dcon);
xcon=zeros(1,cc(2))';
pcon=1:nnodos;
ngl = 2*nnodos;
if elemtype==1
    T0=zeros(1,nnodos)';
else if elemtype==2
    T0=zeros(1,(ney*2+1)*(nex*2+1))';
else
end
end

...

hidromecanico2d_T3_T6;

```

ANÁLISIS EXPERIMENTAL



SIMULACIÓN NUMÉRICA

